



Universidad
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio de valorización energética de residuos agrícolas y forestales para usos urbanos e industriales en Campo de Cariñena (CEIS-Campo de Cariñena)

Autora

Alodia Buil Escartín

Director y ponente

Francisco Javier De Miguel Labisbal (director)

Francisco Javier Royo Herrer (ponente)



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Zaragoza, junio de 2015



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Alodia Buil Escartín

con nº de DNI 18060542E en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado _____, (Título del Trabajo)

Estudio de valorización energética de residuos agrícolas y forestales para usos
urbanos e industriales en Campo de Cariñena (CEIS-Campo de Cariñena)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 23 de junio de 2015

Fdo: Alodia Buil Escartín

Estudio de valorización energética de residuos agrícolas y forestales para usos urbanos e industriales en Campo de Cariñena (CEIS-Campo de Cariñena)

RESUMEN

La empresa Recursos Energéticos Rurales S.L. ha decidido poner en marcha el Proyecto CEIS, con la colaboración del Clúster Empresarial Biomasa & Energía, cuyo objetivo es la implantación de una red de Centros Energéticos Integrales Sostenibles (CEIS) en municipios de toda España. Un CEIS es un concepto innovador, inspirado en la economía circular y desarrollado por la propia empresa, para la gestión integral de la biomasa con fines energéticos.

El objetivo es gestionar de forma sostenible los residuos agrícolas y forestales generados en un municipio concreto y alrededores, para posteriormente transformarlos en energía que pueda cubrir parte de la demanda urbana e industrial de dicho emplazamiento. Uno de los municipios donde se va a poner en marcha uno de estos Centros Energéticos es Cariñena.

En el proyecto CEIS-Campo de Cariñena se está estudiando y analizando todas las actividades relacionadas con la revalorización de residuos para la generación de energía, desde la logística de la biomasa, hasta la distribución de energía térmica en el municipio. El presente trabajo se va a centrar en la evaluación de recursos locales y en la tecnología encargada de transformar los residuos biomásicos en energía.

En primer lugar se ha realizado un estudio preliminar, para analizar cuántos residuos agrícolas y forestales se producen en la comarca Campo de Cariñena, de cuántos se pueden disponer para usarlos como biomasa, y si la energía que se obtiene en la combustión de dicha biomasa es suficiente para cubrir la demanda térmica considerada.

A partir de este primer análisis, se ha pasado a estudiar la transformación de los residuos biomásicos en energía térmica y eléctrica, gracias a una central de cogeneración. Se ha analizado la instalación considerando diferentes opciones, se ha realizado el predimensionado de la central de cogeneración y de sus equipos, y se ha estudiado su comportamiento ante variaciones que puedan experimentar parámetros importantes. Una vez estudiada la viabilidad técnica, se ha pasado a estudiar la viabilidad económica de la central de cogeneración, analizando su rentabilidad económica en diferentes escenarios.

Finalmente, y como se podrá comprobar conforme se va desarrollando el trabajo, las principales conclusiones que se han obtenido son que hay recursos biomásicos suficientes para cubrir la demanda energética, y que el proyecto es factible desde el punto de vista técnico y económico.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Situación energética en Cariñena.....	1
1.2. Qué son y en qué consisten los Centros Energéticos Innovadores Sostenibles (CEIS)	1
1.3. CEIS en Cariñena.....	1
1.4. Objetivos.....	2
1.5. Metodología	2
1.6. Estructura	2
2. Análisis energético del municipio de Cariñena: consumos y recursos.	5
2.1. Cantidad y características de la biomasa potencial.....	5
2.2. Demanda energética urbana e industrial.	7
3. Diseño del CEIS en Cariñena	13
3.1. Análisis de la demanda y la energía disponible.....	13
3.2. Descripción de la instalación.	15
3.3. Diferentes opciones para el sistema de calefacción.....	16
3.4. Dimensionado de la instalación y los equipos.	18
3.5. Selección de la alternativa a considerar.	25
4. Análisis económico.	27
4.1. Costes de Inversión.....	27
4.2. Costes de operación y mantenimiento	27
4.3. Ingresos.	28
4.4. Análisis de sensibilidad.....	29
5. Conclusiones.....	33
6. Referencias	35
ANEXO	37

Índice de tablas

Tabla 1. Superficie potencial (ha).....	5
Tabla 2. Ratios de la biomasa potencial seca (t/ha).....	6
Tabla 3. Biomasa potencial (t.m.s)	6
Tabla 4. Poder calorífico de los diferentes tipos de biomasa.....	7
Tabla 5. Energía de la biomasa potencial (GJ).....	8
Tabla 6. Consumo mensual de ACS en Cariñena.....	10
Tabla 7. Consumo mensual de calefacción en Cariñena	11
Tabla 8. Demanda industrial de energía térmica	12
Tabla 9. Demandas mensuales a cubrir.....	14
Tabla 10. Energía y cantidad de biomasa disponible	14
Tabla 11. Variación de potencias y caudales (manteniendo mt1 constante).....	20
Tabla 12. Variación de carga en las turbinas	20
Tabla 13. Valores mínimos para satisfacer la demanda cada mes.	20
Tabla 14. Valores que cumplen los requisitos iniciales establecidos.	21
Tabla 15. Variación del caudal con los valores que cumplen los requisitos.....	21
Tabla 16. Variación de la potencia y los caudales (rendimiento isoentrópico variable).....	22
Tabla 17. Variación de la temperatura y la presión del vapor vivo	23
Tabla 18. Valores que cumplen los requisitos iniciales establecidos	25
Tabla 19. Variación del caudal con los valores que cumplen los requisitos iniciales establecidos.....	25
Tabla 20. Variación del trabajo neto y del rendimiento eléctrico equivalente del ciclo.....	25
Tabla 21. Inversión inicial	27
Tabla 22. Gastos de personal	28
Tabla 23. Gastos anuales.....	28
Tabla 24. Producción de energía anual	29

Índice de gráficas

Gráfica 1. Consumo mensual de calefacción y ACS.....	11
Gráfica 2. Variación demanda industrial	12
Gráfica 3. Energía de los residuos de cultivos herbáceos en función de su disponibilidad.....	23
Gráfica 4. Valor del precio de la electricidad y el calor	30
Gráfica 5. Valor del precio de la electricidad y el calor	31
Gráfica 6. Valor del precio de la electricidad y el calor	32

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de la instalación	15
Figura 2. Redes de distribución (radiadores)	17

1. Introducción

1.1. Situación energética en Cariñena

Cariñena es el municipio más grande de la comarca Campo de Cariñena y está situado a unos 50 km de Zaragoza. En este municipio residen unas 3.540 personas en 1.330 viviendas, de las cuales el 85% dispone de calefacción [1]. En la mayoría de los casos dicha calefacción se realiza mediante radiadores y calderas de gas.

En cuanto al sector industrial, en el municipio de Cariñena existen dos grandes industrias, que por su actividad productiva, requieren una gran cantidad de energía térmica. Dicha demanda térmica se está cubriendo actualmente mediante calderas industriales de gas y de biomasa.

Otro sector muy importante es el sector agrícola, y en especial el vinícola. En total se encuentran repartidas, por toda la comarca, una extensión de 14.388 hectáreas de viñedo y cerca de 1.540 viticultores que se ocupan directamente de las viñas, y que constituyen el principal soporte económico de la comarca. De estos viñedos obtienen su materia prima unas 50 bodegas, (que actualmente cubren su demanda térmica principalmente mediante el uso de combustibles fósiles) y de los cuales se puede obtener una gran cantidad de biomasa como se verá más adelante [2].

1.2. Qué son y en qué consisten los Centros Energéticos Innovadores Sostenibles (CEIS)

En un Centro Energético Innovador Sostenible (CEIS) se genera energía de forma centralizada a partir de fuentes renovables, fundamentalmente biomasa, para cubrir las necesidades energéticas de las industrias y de los habitantes de la zona donde se implanta. La generación de energía térmica y eléctrica, a partir de biomasa, se realiza a través de una central de cogeneración.

Sin embargo, un CEIS no se centra solo en el lugar físico donde dicha biomasa se transforma en energía, sino que engloba otras actividades como la gestión de residuos agrícolas y su revalorización energética, o la gestión de las redes de calor que abastecen la demanda urbana e industrial. En el CEIS también se considera la posibilidad de desarrollar nuevas iniciativas de transformación de productos agro-alimentarios, que requieran energía térmica en sus procesos.

El concepto CEIS se basa en la economía circular, donde los residuos de un proceso son la principal fuente de materia prima de otro. En particular se ponen en valor los residuos agrícolas, que en muchos casos suponen un problema para los municipios, y se limpian los bosques. Esta gestión optimizada proporciona a los municipios energía competitiva, lo cual supone creación de empleo estable, limpieza de bosques y eliminación de residuos, así como un ahorro para la población y las industrias de la zona. Además, a través de los CEIS se consigue una reducción de los gases efecto invernadero, lo cual es muy importante para muchas empresas que deben reducir su huella de CO₂, y que lo conseguirían cubriendo su demanda con la energía generada en los CEIS.

1.3. CEIS en Cariñena

La empresa que desarrolla los CEIS, Recursos Energéticos Rurales S.L., ha decidido implantar un centro en el municipio de Cariñena, principalmente por dos razones:

- La gran actividad agrícola del municipio, especialmente la vinícola. Ya que es un sector que genera muchos residuos que pueden ser utilizados como biomasa.
- Es un municipio con una demanda urbana considerable y con industrias que requieren importantes cantidades de energía térmica para llevar acabo sus procesos productivos.

1.4. Objetivos

En el CEIS de Cariñena se gestionaran todas las actividades involucradas en la revalorización de residuos para la producción de energía que cubran la demanda urbana e industrial del municipio. En el presente trabajo se va a tratar desde la evaluación de recursos, hasta la transformación de la biomasa en energía gracias a una central de cogeneración.

Por tanto el principal objetivo de este trabajo es **analizar la viabilidad de una central de cogeneración en Cariñena, que suministrará energía térmica y eléctrica a parte de los habitantes e industrias del municipio y utilizará como materia prima la biomasa local, desde un punto de vista técnico y económico.**

1.5. Metodología

En primer lugar se ha analizado la cantidad de biomasa potencial en la comarca, utilizando las bases de datos Política Agrícola Común (PAC) [3] y 3º Mapa Forestal de España [4], y la demanda térmica urbana e industrial del municipio, a partir de los datos proporcionados por las propias industrias y bodegas, y bases de datos de instituciones públicas como el Instituto Aragonés de Estadística (IAEST) [1] y los boletines de Coyuntura energética en Aragón [5].

Una vez conocida la materia prima disponible y la demanda a cubrir, se han diseñado y analizado los equipos de la central de cogeneración con la ayuda del software EES (Engineering Equation Solver). Gracias a este software y al uso de las herramientas Office como Microsoft Excel, se han realizado análisis de sensibilidad para estudiar cómo se comporta el ciclo de la central de cogeneración ante variaciones de parámetros internos (presión y temperatura del vapor vivo), así como ante variaciones de la demanda térmica a cubrir.

Finalmente, tras estudiar la viabilidad técnica de la central de cogeneración, se ha analizado su viabilidad económica utilizando la herramienta Microsoft Excel. A partir de los resultados del ciclo térmico que se han obtenido con el software EES, y a partir de datos proporcionados por la empresa que desarrolla el CEIS, se ha analizado la rentabilidad económica del proyecto en diferentes escenarios.

1.6. Estructura

El trabajo se desarrolla, a partir de la presente introducción, siguiendo la siguiente estructura por capítulos:

2. Análisis energético del municipio de Cariñena: Se analiza la cantidad de biomasa existente en la comarca, sus características y la energía que se puede obtener de ella mediante combustión. También se estudia cuál es la demanda térmica urbana e industrial del municipio.

3. Diseño CEIS en Cariñena: En primer lugar se selecciona, de entre el total de los residuos biomásicos y la demanda analizada en el segundo capítulo, cuál es la demanda que se va cubrir y los residuos disponibles que se pueden utilizar como biomasa, es decir, residuos que actualmente no presentan otros usos. Posteriormente se describe la instalación y los equipos que conforman la central de cogeneración, y se presentan las diferentes opciones. Finalmente se dimensiona la instalación y los equipos, y se selecciona, dentro de las diferentes opciones presentadas, la alternativa a considerar.

4. Análisis económico: A partir de los datos estudiados en el tercer capítulo, se calcula los gastos de inversión que se deben realizar para poner en marcha la central y los gastos de operación y mantenimiento que se deberán afrontar cada año. También se calcula cuáles serán los ingresos que se obtendrán gracias a la venta de la energía eléctrica y térmica. Una vez conocidos estos datos, se analiza la rentabilidad del proyecto en función de diferentes variables, como el precio de la electricidad y del calor.

2. Análisis energético del municipio de Cariñena: consumos y recursos.

2.1. Cantidad y características de la biomasa potencial.

En este apartado se analiza la cantidad y las características energéticas de cada tipo de biomasa residual agrícola y forestal, existente en la comarca Campo de Cariñena.

Superficie de la biomasa potencial:

En la Tabla 1 se muestran la superficie de cultivos leñosos y herbáceos [3], así como la superficie de bosque [4] de todos los municipios de la comarca y de otros como Ricla, Alpartir, Almonacid de la Sierra y La Almunia de Doña Godina, próximos a Cariñena.

La superficie de frutales se refiere a almendro, melocotonero, nectarina, albaricoquero, peral, manzano, cerezo, ciruela y nogal. La superficie de cultivos herbáceos se refiere a trigo, cebada y avena.

Tabla 1. Superficie potencial (ha)

	SUPERFICIE POTENCIAL (Ha)						
	Cultivos leñosos	Frutales	Olivar	Viñedo	Cultivos herbáceos	Bosques	TOTAL
Villanueva	500	133	22	345	1.563	3.541	5.604
Mezalocha	220	35	12	173	1.075	3.084	4.379
Tosos	1.041	297	23	721	1.119	2.976	5.136
Ricla	2.690	2.532	153	5	722	2.914	6.326
Paniza	1.528	42	12	1.474	104	2.171	3.803
Vistabella	40	29	1	10	0	2.063	2.102
Alpartir	632	384	216	31	7	1.981	2.621
Aguilón	170	156	4	10	1.901	1.980	4.052
Encinacorba	388	69	5	314	125	1.979	2.492
Aladrén	117	46	1	71	37	1.662	1.816
Cosuenda	847	188	96	564	148	1.321	2.316
Muel	318	33	68	217	2.197	1.229	3.744
Aguarón	1.243	59	24	1.159	121	1.211	2.574
Almonacid de la Sierra	1.982	861	140	981	306	955	3.243
La Almunia de Doña Godina	2.127	1.746	370	11	271	843	3.241
Alfamen	2.580	957	153	1.470	2.860	245	5.686
Longares	1.849	51	66	1.732	858	207	2.914
Cariñena	4.771	315	40	4.416	899	127	5.797
TOTAL	23.042	7.932	1.404	13.706	14.314	30.488	67.844

Biomasa potencial:

Para calcular la cantidad de biomasa potencial, se deben conocer de forma aproximada, ya que estos valores dependen de muchas variables, los ratios que relacionan la superficie cultivada con la generación de biomasa, llamados Ratio Residuo Superficie (RRS).

En la Tabla 2 se muestran los ratios de la biomasa potencial seca de cultivos leñosos, cultivos herbáceos y de bosque.

Tabla 2. Ratios de la biomasa potencial seca (t/ha)

Viñedo [6], [7], [8]		Olivo [6], [7], [8]		Frutal [6], [7], [8]		Herbáceos [9]		Bosque [8]	
RRS (t/ha)	%Hum	RRS (t/ha)	%Hum	RRS (t/ha)	%Hum	RRS (t/ha)	%Hum	RRS (t/ha)	%Hum
0,88	0%	0,63	0%	1,27	0%	2,94	0%	0,53	0%

A través de estos ratios RRS (t/ha), se puede estimar la cantidad de biomasa seca en un año:

$$\text{Biomasa(t)} = \text{Superficie(ha)} \cdot \text{RRS(t/ha)}$$

Estos valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Biomasa potencial (t.m.s)

	TONELADAS POTENCIALES de BIOMASA SECA/año						
	Cultivos leñosos	Frutales	Olivar	Viñedo	Cultivos herbáceos	Bosques	TOTAL
Villanueva	486	168	14	304	4.592	1.859	6.937
Mezalocha	204	44	8	152	3.158	1.619	4.981
Tosos	1.025	376	14	634	3.288	1.562	5.875
Ricla	3.307	3.207	96	5	2.119	1.530	6.957
Paniza	1.358	53	7	1.297	306	1.140	2.804
Vistabella	46	37	0	9	0	1.083	1.129
Alpartir	650	487	136	28	20	1.040	1.711
Aguilón	209	198	2	9	5.584	1.040	6.834
Encinacorba	367	87	3	277	366	1.039	1.773
Aladrén	121	58	0	62	108	872	1.101
Cosuenda	794	238	60	496	433	693	1.921
Muel	275	42	43	191	6.455	645	7.376
Aguarón	1.110	75	15	1.020	354	636	2.101
Almonacid de la Sierra	2.041	1.090	88	863	897	502	3.441
La Almunia de Doña Godina	2.453	2.212	232	10	797	442	3.692
Alfamen	2.601	1.212	96	1.294	8.403	129	11.133
Longares	1.629	64	41	1.524	2.521	109	4.259
Cariñena	4.309	399	25	3.885	2.641	67	7.016
TOTAL	22.984	10.046	881	12.058	42.051	16.006	81.042

Energía de la biomasa potencial:

La biomasa presenta la siguiente humedad cuando se recoge del campo [3]:

- Cultivos leñosos: 35% humedad (en b.h.)
- Cultivos herbáceos: 15% humedad (en b.h.)
- Restos forestales: 50% humedad (en b.h.)

Cuando la biomasa se utiliza en la caldera, se va a considerar que ésta tiene una humedad del 25% (en b.h.), excepto los restos de cultivos herbáceos que se queman a la misma humedad con la que se han recogido (15% hum). De manera que, tanto los restos de cultivos leñosos como los restos forestales, se secan de forma natural antes de ser utilizados en la caldera, para reducir su humedad a un 25% (en b.h.). Durante este secado también se considera que un 2% de la materia seca se pierde.

Para calcular la energía que se puede obtener de la biomasa, se debe conocer el poder calorífico de los cultivos leñosos [7] y de la masa forestal [10] con 25% de humedad (en b.h.) y el poder calorífico de los cultivos herbáceos [7] con 15% de humedad (en b.h.), que aparecen en la Tabla 4.

Tabla 4. Poder calorífico de los diferentes tipos de biomasa

	Cultivos leñosos	Cultivos herbáceos	Residuos forestales
Humedad (en b.h.)	0%	0%	0%
PCSo (kJ/kg)	19.150	18.670	20.000
Humedad (en b.h.)	25%	15%	25%
PCI (kJ/kg)	12.759	14.376	13.401

$$\text{Energía (GJ)} = \text{Masa(kg)} \cdot \text{PCI(GJ/kg)}$$

La energía de la biomasa potencial se presenta en la Tabla 5.

2.2. Demanda energética urbana e industrial.

A continuación se va a calcular cuánta energía térmica, para calefacción y ACS, demanda el municipio de Cariñena y la energía térmica que demandan las bodegas e industrias locales.

Demanda de energía mensual en Cariñena: El tipo de energía térmica para esta demanda es agua caliente a 95°C o a 60°C (ver apartado 3.3).

En la Tabla 6 se muestra la energía térmica mensual asociada al consumo de ACS.

Tabla 5. Energía de la biomasa potencial (GJ)

	ENERGÍA de la BIOMASA POTENCIAL (GJ)/año						
	Cultivos leñosos	Frutales	Olivar	Viñedo	Cultivos herbáceos	Bosques	TOTAL (GJ)
Villanueva	8.080	2.826	236	5.017	77.674	33.962	119.715
Mezalocha	3.383	741	133	2.509	53.423	29.577	86.382
Tosos	17.052	6.326	243	10.483	55.619	28.537	101.208
Ricla	55.637	53.925	1.635	76	35.854	27.950	119.441
Paniza	22.453	896	123	21.433	5.182	20.816	48.451
Vistabella	769	615	7	146	0	19.783	20.552
Alpartir	10.948	8.184	2.309	455	353	19.003	30.304
Aguilón	3.515	3.328	38	149	94.456	18.994	116.965
Encinacorba	6.088	1.461	57	4.569	6.207	18.977	31.272
Aladrén	2.009	975	7	1.027	1.837	15.936	19.781
Cosuenda	13.221	4.008	1.019	8.195	7.332	12.667	33.220
Muel	4.585	712	724	3.149	109.187	11.782	125.554
Aguarón	18.372	1.262	255	16.855	6.002	11.614	35.988
Almonacid de la Sierra	34.090	18.330	1.497	14.263	15.187	9.162	58.439
La Almunia de Doña Godina	41.293	37.192	3.943	158	13.481	8.081	62.855
Alfamen	43.383	20.375	1.632	21.376	142.125	2.351	187.859
Longares	26.962	1.081	700	25.181	42.639	1.986	71.587
Cariñena	71.325	6.704	421	64.199	44.669	1.218	117.212
TOTAL (GJ)	383.163	168.942	14.981	199.240	711.228	292.394	1.386.785

La energía térmica mensual (Q_a) asociada al consumo de ACS por persona (ver Tabla 6) se calcula como:

$$Q_a = c \cdot \dot{m} \cdot (t_{ac} - t_r) \cdot n \cdot \rho$$

Donde,

Q_a : Energía térmica mensual para cubrir la demanda de ACS de una persona [J/mes].

\dot{m} : Caudal demandado de ACS por día (l/día). Este valor se ha calculado conociendo el consumo de ACS por persona al día [11], que se considera que es de 30 l, y el número de habitantes de Cariñena [1].

c : Calor específico del agua [12].

t_{ac} : Temperatura del A.C.S. demandada, que es de 60 °C [11].

t_r : Temperatura del agua fría de red [13].

n : Número de días del mes que se considera (día/mes).

ρ : Densidad del agua [12].

Debido a la proximidad que existe entre Cariñena y Zaragoza, para calcular el consumo de energía para calefacción se va a tener en cuenta el consumo específico de gas natural para calefacción en Zaragoza (de la que se dispone de datos), donde la climatología es muy similar. Una vez conocido el consumo mensual de gas natural [5], y considerando que las calderas de los hogares tienen un rendimiento del 90%, se calcula la demanda de energía térmica para calefacción en Zaragoza.

A partir de esta demanda de energía en Zaragoza, que es de 14.881.086 GJ/año, y conociendo su número de habitantes [1], se calcula el consumo per cápita. Dato con el cual se calcula el consumo de calefacción mensual en Cariñena.

En la Tabla 7 se muestra la energía térmica mensual asociada al consumo de calefacción.

En la Gráfica 1 se compara la energía térmica consumida para ACS, con la que se consume para calefacción cada mes.

Demanda industrial mensual: El tipo de energía térmica para esta demanda es vapor saturado a 8 bar.

En la Tabla 8 se muestra una estimación de cómo varía la demanda industrial considerada en el proyecto, formada por la demanda de las bodegas y de dos industrias locales, a partir de datos recogidos por la empresa Recursos Energéticos Rurales S.L. Por motivos de confidencialidad no se puede desglosar dicha demanda.

En la Gráfica 2 se muestra la variación de la demanda industrial.

Tal y como se muestra en la Gráfica 2, la mayor parte de los consumos de las industrias y las bodegas se producen entre los meses de septiembre y abril, disminuyendo considerablemente la demanda de energía térmica durante los meses de verano.

Ésto se debe a que una de las dos industrias consideradas, al igual que las bodegas, está relacionadas con el proceso de fabricación del vino. De manera que los meses de demanda máxima coinciden con la temporada de campaña en la recogida de la uva, que se realiza entre septiembre y noviembre, y con el resto de meses hasta abril, donde se realizan otros procesos relacionados con la elaboración del vino. Sin embargo entre los meses de mayo y julio las bodegas y esta industria prácticamente no consumen energía térmica, ya que únicamente realizan actividades auxiliares cuyo consumo es únicamente eléctrico.

Tabla 6. Consumo mensual de ACS en Cariñena

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Días mes, N	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Consumo diario de agua (litros/día)	106.110	106.110	106.110	106.110	106.110	106.110	106.110	106.110	106.110	106.110	106.110	106.110
Consumo mensual de agua (litros/mes)	3.289.410	2.971.080	3.289.410	3.183.300	3.289.410	3.183.300	3.289.410	3.289.410	3.183.300	3.289.410	3.183.300	3.289.410

CALCULO DEL CONSUMO

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Tº agua demanda (°C) [8]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Tº agua fría de red (°C) [9]	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Salto de temperatura (°C)	55	54	52	50	49	48	47	48	49	50	52	55
Demanda de energía ACS (MJ/mes)	757.502	671.755	716.184	666.424	674.865	639.767	647.320	661.092	653.095	688.638	693.081	757.502
Demanda de energía ACS (MWh/mes)	210	187	199	185	187	178	180	184	181	191	193	210
Demanda de energía ACS (kJ/s)	283	251	267	249	252	239	242	247	244	257	259	283

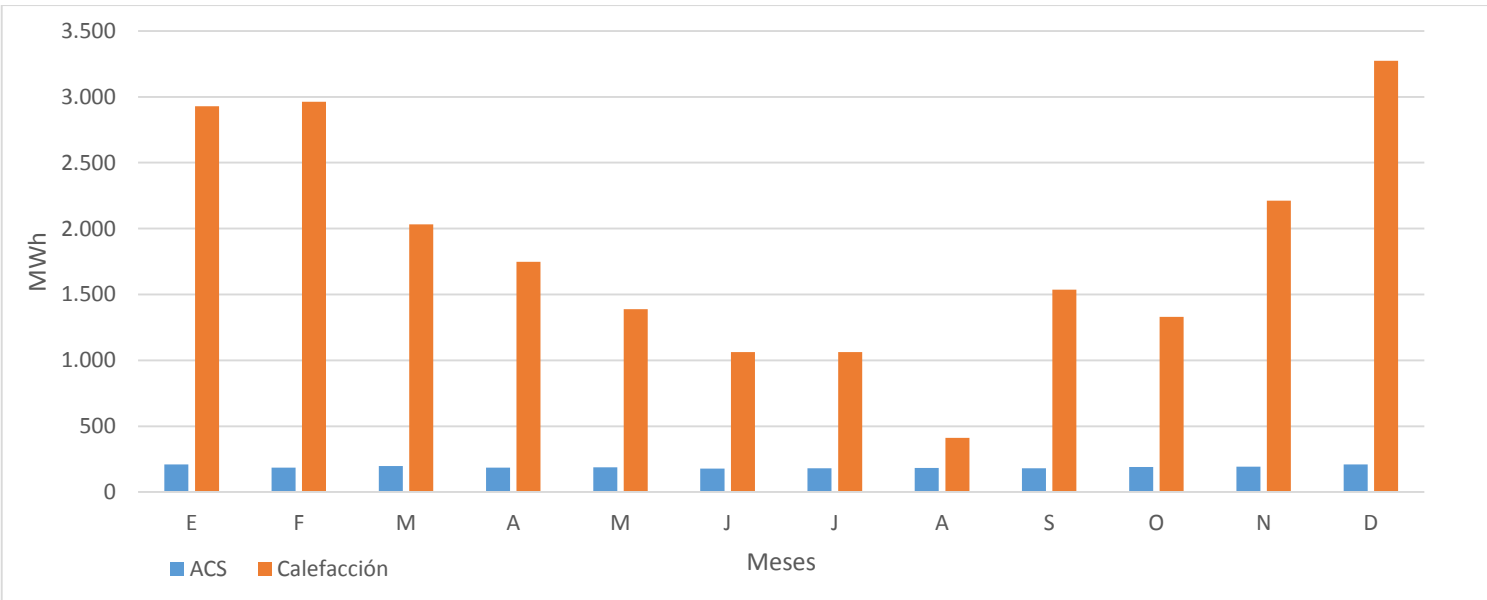
Demanda anual de energía ACS (MWh/año)**2.285**

Tabla 7. Consumo mensual de calefacción en Cariñena

Consumo per capita	2,98	3,02	2,07	1,78	1,41	1,08	1,08	0,42	1,56	1,35	2,25	3,33
Demanda de energía térmica en Cariñena (GJ)	10.544	10.668	7.315	6.289	5.001	3.827	3.823	1.484	5.535	4.791	7.964	11.783
Demanda de energía térmica (MWh/mes)	2.929	2.963	2.032	1.747	1.389	1.063	1.062	412	1.537	1.331	2.212	3.273
Demanda de energía térmica (kJ/s)	3.937	3.983	2.731	2.348	1.867	1.429	1.427	554	2.066	1.789	2.973	4.399

Demanda anual de energía Calefacción (MWh/año)

21.951

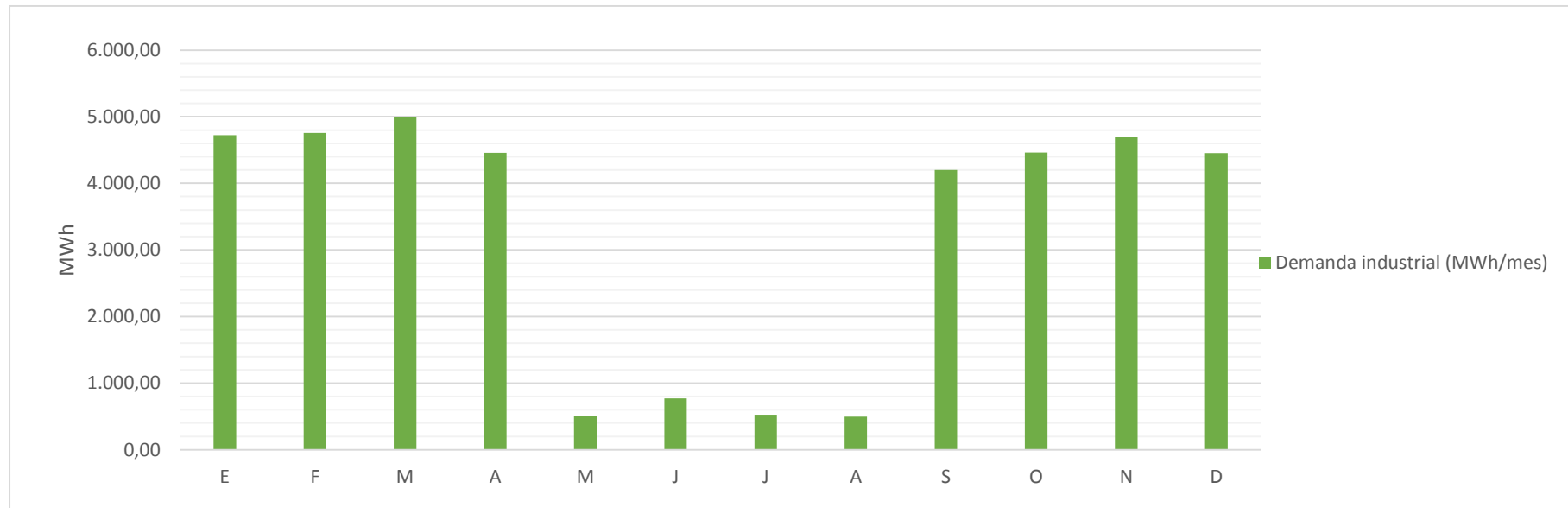


Gráfica 1. Consumo mensual de calefacción y ACS

Tabla 8. Demanda industrial de energía térmica

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Demanda industrial (MWh/mes)	4.725,27	4.756,03	4.998,26	4.459,52	509,07	770,32	525,59	499,30	4.200,37	4.463,88	4.690,67	4.454,15
Demanda industrial (kJ/s)	6.351	6.606	6.718	6.194	684	1.070	706	671	5.834	6.000	6.515	5.987

Demanda anual (MWh/año)	39.052,43
--------------------------------	------------------



Gráfica 2. Variación demanda industrial

3. Diseño del CEIS en Cariñena

3.1. Análisis de la demanda y la energía disponible.

Antes de diseñar la instalación, se debe analizar cuál es la demanda energética a cubrir, ya que no toda la población del municipio va a querer cambiar su sistema de calefacción, y cuál es la disponibilidad de la biomasa, porque actualmente parte de esta biomasa se requiere para otros usos, como se explica a continuación.

Se considera que de la demanda urbana total se va a cubrir el 50%, ya que es razonable pensar que no todos los habitantes del municipio de Cariñena van a estar dispuestos a cambiar su instalación de calefacción. Y de la demanda industrial considerada en el segundo capítulo (dos grandes industrias y las bodegas) se va a cubrir el 100%, gracias a acuerdos establecidos entre las industrias y las bodegas con la empresa que va a desarrollar el CEIS en Cariñena.

En la Tabla 9 se muestra las demandas mensuales que finalmente se deberán cubrir.

A partir del estudio realizado en el segundo capítulo sobre la cantidad y las características de los diferentes tipos de biomasa existente en la comarca Campo de Cariñena, se analiza la disponibilidad de cada una de ellas para su uso como biomasa. Inicialmente se va a considerar que de la biomasa potencial procedente de:

- Cultivos leñosos, se va a disponer como máximo del 80%. Los restos de poda procedentes de estos cultivos tienen poco uso actualmente, solo se utilizan en algunos casos para la calefacción individual o para asados y barbacoas. En el resto de los casos, la gestión de estos residuos supone una carga extra para el agricultor, que no genera ningún valor añadido. Por eso se considera que la disponibilidad de biomasa residual es muy alta.
- Cultivos herbáceos, se va a disponer como máximo del 50%. La variación en la producción y demanda interanual de estos cultivos es alta, por lo que pueden existir importantes diferencias entre la biomasa realmente producida y la biomasa finalmente disponible en el mercado. Según las cooperativas de la zona a las que se ha consultado, actualmente los restos de estos cultivos se quedan en el campo o se empacan para vender como alimento de animales.
- Restos forestales, se va a disponer como máximo del 10%. La disponibilidad de biomasa forestal es difícil de estimar ya que no hace referencia solo a cuestiones de precio, sino que depende además de cuestiones medioambientales (explotación racional y sostenible de los bosques), técnico-económicas (capacidad de acceder a una masa forestal para su tratamiento) o cuestiones políticas forestales (interés de promover unos tipos de intervenciones, por ejemplo, orientadas a la prevención de incendios). Por eso finalmente, y dada la situación actual de las políticas forestales en Aragón, se ha decidido considerar un porcentaje bajo de disponibilidad.

En función de estos porcentajes de disponibilidad, en la Tabla 10 se muestra la energía y las toneladas realmente disponibles de los diferentes tipos de biomasa. Estos porcentajes pueden variar, sobre todo en el caso de los cultivos herbáceos debido a que la variación en la producción interanual de estos cultivos es alta

Tabla 9. Demandas mensuales a cubrir

	% demanda urbana a cubrir					% demanda industrial a cubrir						
	50%					100%						
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Demanda urbana a cubrir (kJ/s)	2.110	2.117	1.499	1.298	1.060	834	835	400	1.155	1.023	1.616	2.341
Demanda industrial a cubrir (kJ/s)	6.351	6.606	6.718	6.194	684	1.070	706	671	5.834	6.000	6.515	5.987
Demanda total a cubrir (kJ/s)	8.461	8.722	8.217	7.492	1.744	1.904	1.541	1.072	6.989	7.023	8.131	8.328

Tabla 10. Energía y cantidad de biomasa disponible

	% disponibilidad	cantidad disponible (t.m.s.)	Energía disponible (GJ)
Cultivos leñosos	80%	18.387	306.558
Cultivos herbáceos	50%	21.026	355.614
Bosques	10%	1.601	29.239
Total		41.014	691.412

- Intercambiadores de calor, donde se transmite la energía térmica a las diferentes redes de distribución para cubrir la demanda urbana e industrial.
 - Primer intercambiador: El vapor se condensa y cede la energía térmica necesaria para cubrir la demanda industrial (Q_1).
 - Segundo intercambiador: La energía térmica necesaria para cubrir la demanda urbana también se consigue gracias a la condensación del vapor, pero a menor presión (Q_2).
- Condensador, donde se absorbe la diferencia de energía entre los meses de mayor y menor demanda térmica.
- Bombas para llevar el agua de los intercambiadores y el condensador a la caldera, y así cerrar el circuito.

En la Figura 2 se muestra un posible esquema de las redes de distribución de calor, suponiendo que los usuarios utilizan radiadores como sistema de calefacción.

- La red de distribución urbana transporta el calor generado en el segundo intercambiador de la central de cogeneración (ver Figura 1) a los centros de intercambio, donde a través de otras redes de distribución más pequeñas, llega a los usuarios. Se considera que tanto en el intercambiador como en el centro de intercambio, la diferencia entre la entrada del fluido “caliente” y la salida del fluido “frío” es de 10 °C.
- Para cubrir la demanda industrial se utiliza otra red de distribución muy similar a esta, pero con un fluido caloportador a mayor temperatura y presión, que transporta el calor generado en el primer intercambiador a las industrias y las bodegas, a través de otros centros de intercambio. Las industrias y bodegas demandan vapor saturado a 8 bar de presión. Y al igual que en la red de distribución urbana la diferencia entre la entrada del fluido “caliente” y la salida del fluido “frío” es de 10 °C.

3.3. Diferentes opciones para el sistema de calefacción.

Para el caso de la demanda urbana en general existen diferentes opciones, en función del sistema de calefacción que utilicen los usuarios:

- Radiadores: El fluido caloportador que circula por los radiadores de los usuarios es agua a una temperatura entre 80 y 85 °C.
- Suelo radiante: El fluido caloportador que circula por el circuito de suelo radiante es agua a una temperatura entre 35 y 45 °C.

En cualquiera de los dos casos se ha establecido que la red de distribución de ACS transporta agua a 60 °C [8].

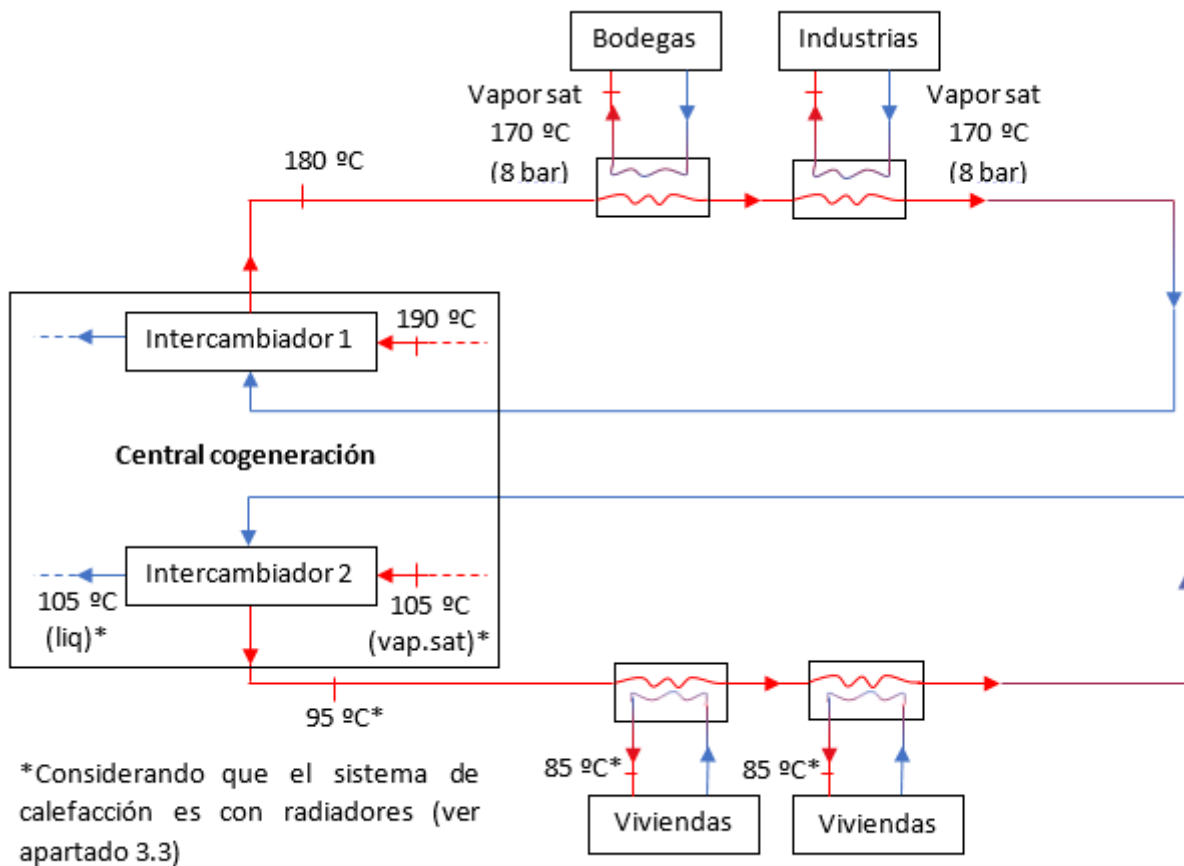


Figura 2. Redes de distribución (radiadores)

Como ya se ha explicado anteriormente, la red de distribución urbana debe transportar la energía térmica necesaria para cubrir tanto la demanda de calefacción como de ACS.

- Si los usuarios utilizan radiadores, la temperatura del agua que circula por éstos (85 °C) es mayor que la temperatura del ACS (60 °C). Por lo que la red de distribución transportará la energía necesaria para cubrir tanto la demanda de calefacción como la de ACS a una temperatura de 95°C. Esta energía se genera en el intercambiador 2, por donde el fluido deberá circular a una temperatura de 105 °C (Figura 2)
- Si los usuarios utilizan suelo radiante, la temperatura del agua que circula por éstos (35 °C) es menor que la temperatura de distribución de ACS (60 °C). Por lo que la red de distribución transportará la energía necesaria para cubrir la demanda de calefacción y ACS a una temperatura de 70 °C. De manera que en este caso el fluido que circula por el intercambiador 2 deberá estar a una temperatura de 80 °C.

En el caso particular del CEIS de Cariñena:

- Las industrias y bodegas demandan vapor saturado a 8 bar de presión (aprox. 170 °C), así que para cubrir la demanda industrial se va a utilizar una red de calor, por la que circulará vapor saturado a 180 °C. De manera que en el primer intercambiador el fluido deberá circular a 190 °C.

- Para cubrir la demanda urbana, como todos los usuarios del municipio disponen de radiadores como sistema de calefacción, el agua que circula por la red de distribución estará a una temperatura de 95 °C. De manera que el fluido que circula por el segundo intercambiador deberá estar a 105 °C.

Sin embargo no sólo se va a analizar la instalación teniendo en cuenta que el sistema de calefacción de los usuarios es a través de radiadores, sino que también se va a analizar considerando que los usuarios disponen de suelo radiante.

3.4. Dimensionado de la instalación y los equipos.

3.4.1. Análisis de las características de la instalación, considerando que el sistema de calefacción de los usuarios es a través de radiadores.

Este análisis se ha realizado a través del programa EES. En el Anexo se muestran todos los datos y ecuaciones que se han utilizado en el programa para resolver el ciclo, siguiendo la siguiente estructura:

1- DATOS INICIALES: Datos de partida que ya son conocidos o que se han estimado.

Valores requeridos para cubrir la demanda urbana e industrial.

$$T_{\text{industrial}} = 170 + 10 = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{intercamb2}} = 95 + 10 = 105 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (en el caso de calefacción con radiadores)}$$

$$T_{\text{intercamb2}} = 95 + 10 = 105 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (en el caso de calefacción con suelo radiante)}$$

Valores estimados. Posteriormente se realizará un análisis de sensibilidad, para encontrar los valores que maximizan el rendimiento del ciclo.

$$P_1 = 60 \text{ bar}$$

$$T_1 = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{condensador}} = 0,1 \text{ bar}$$

Para el correcto funcionamiento de las bombas es necesario que a la salida de los intercambiadores y el condensador todo el vapor se haya condensado.

$$x_5 = 0$$

$$x_7 = 0$$

$$x_{10} = 0$$

Inicialmente se consideran estos rendimientos isoentropicos, considerando que trabajan a la carga nominal.

$$\eta_{\text{caldera}} = 0,9$$

$$\eta_{\text{st}} = 0,80 \text{ (rendimiento isoentrópico de la turbina)}$$

$$\eta_{\text{sb}} = 0,75 \text{ (rendimiento isoentrópico de la bomba)}$$

2- ESTADOS DE LA INSTALACIÓN: Para cada uno de los estados de la instalación (ver Figura 1) se calcula la temperatura, la presión, la entalpía, la entropía y el caudal.

3- BALANCES de ENERGÍA: Una vez conocidos los caudales y las entalpías de cada estado, se calcula:

- Calor por unidad de tiempo que se intercambia entre los productos de la combustión y el agua en la caldera (Q_e).
- Energía del combustible por unidad de tiempo (F)
- Calor por unidad de tiempo que se obtiene en los intercambiadores (Q_1 y Q_2).
- Calor por unidad de tiempo que sale del condensador (Q_s).
- Energía por unidad de tiempo que se obtiene de las turbinas (W_t).
- Energía por unidad de tiempo que consumen las bombas (W_b).

4- POTENCIA NETA DEL CICLO: Potencia bruta de las turbinas menos la potencia de las bombas y menos un 10% de autoconsumos ($W_{\text{neto}} = (W_t - W_b) \cdot 0,90$)

5- RENDIMIENTO: Rendimiento del ciclo ($\eta_{\text{ciclo}} = W_{\text{neto}}/F$)

6- RENDIMIENTO ELECTRICICO EQUIVALENTE $\left(REE = \frac{W_{\text{neto}}}{F - \left(\frac{Q_1 - Q_2}{\eta_{\text{caldera}}} \right)} \right)$

Análisis de los caudales de diseño de la instalación:

Una vez definidas todas las ecuaciones que describen el ciclo, se calculan los caudales de la instalación y de cada uno de sus equipos.

Los caudales que circulan por los equipos varían cada mes en función de las demandas térmicas. Para determinar su valor, se deben tener en cuenta los siguientes requisitos:

- Para el correcto funcionamiento de las turbinas, su variación de caudal (\dot{m}) no debe ser mayor del 50%.
- Para aumentar el rendimiento del ciclo, el calor cedido en el condensador (Q_s) debe ser el menor posible.

Como primera opción se considera que el caudal que circula por la caldera (\dot{m}_{t1}) es constante e igual al caudal necesario para cubrir la máxima demanda térmica, que se produce en el mes de febrero. Primero se calcula el caudal que va a circular por la caldera durante este mes, teniendo en cuenta que no es necesario que circule caudal por el condensador. Una vez conocido este caudal se fija como dato, y se observa como varían el resto de magnitudes cada mes.

En la Tabla 11 se muestra como varía el caudal que circula por las turbinas (\dot{m}_{t1} , \dot{m}_{t2} y \dot{m}_{t3} , según la Figura 1), el calor por unidad de tiempo cedido en el condensador (Q_s) y la energía por unidad de tiempo aportada por el combustible (F). Estos valores se han calculado a partir de la energía térmica por unidad de tiempo cedida en los intercambiadores, que es igual a la demanda industrial (Q_1) y urbana (Q_2).

Tabla 11. Variación de potencias y caudales (manteniendo mt1 constante)

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Q1 (kW)	6.351	6.606	6.718	6.194	684	1.070	706	671	5.834	6.000	6.515	5.987
Q2 (kW)	2.110	2.117	1.499	1.298	1.060	834	835	400	1.155	1.023	1.616	2.341
Qs (kW)	258	0	496	1.210	6.879	6.720	7.078	7.540	1.705	1.671	581	390
F (kW)	11.600	11.518	11.561	11.753	13.529	13.435	13.550	13.617	11.885	11.849	11.611	11.686
mt1 (kg/s)	4,027	4,027	4,027	4,027	4,027	4,027	4,027	4,027	4,027	4,027	4,027	4,027
mt2 (kg/s)	1,091	0,973	0,922	1,164	3,711	3,532	3,701	3,717	1,330	1,253	1,015	1,259
mt3 (kg/s)	0,121	0,000	0,232	0,567	3,223	3,149	3,317	3,533	0,799	0,783	0,272	0,183

A partir de estos datos, en la Tabla 12 se calcula la variación de caudal que sufren las turbinas.

Tabla 12. Variación de carga en las turbinas

	Caudal máximo	Caudal mínimo	Variación caudal
m1 (1ª turbina)	4,027	4,027	0%
m3 (2ª turbina)	3,717	0,922	75%
m4 (3ª turbina)	3,533	0,121	97%

La primera turbina no sufre ninguna variación de carga, ya que el caudal que circula por ella es el que se ha fijado como dato, y es constante todos los meses. Sin embargo la variación de carga que sufren las demás turbinas es demasiado grande y, como se ha explicado antes, este valor no debe ser superior al 50%.

Para solucionar este problema, como segunda opción se considera que el caudal que circula por la caldera (mt1) toma valores diferentes cada mes, en vez de mantenerse constante todo el año.

En la Tabla 13 se muestran los caudales mínimos que deben circular por las turbinas para satisfacer la demanda cada mes.

Tabla 13. Valores mínimos para satisfacer la demanda cada mes.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Q1 (kW)	6.351	6.606	6.718	6.194	684	1.070	706	671	5.834	6.000	6.515	5.987
Q2 (kW)	2.110	2.117	1.499	1.298	1.060	834	835	400	1.155	1.023	1.616	2.341
Qs (kW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F (kW)	11.183	11.519	10.761	9.799	2.419	2.582	2.119	1.440	9.131	9.150	10.672	11.055
mt1 (kg/s)	3,91	4,03	3,80	3,46	0,80	0,88	0,71	0,49	3,23	3,24	3,76	3,84
mt2 (kg/s)	0,97	0,97	0,69	0,60	0,49	0,38	0,38	0,18	0,53	0,47	0,74	1,08
mt3 (kg/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A partir de los datos de la Tabla 13 se calcula entre qué valores se pueden encontrar los caudales de las turbinas para que su variación de carga no sea superior al 50%.

- mT1: 5,10 - 2,60 kg/s
- mT2: 2,00 - 2,30 kg/s
- mT3: 1,10 - 2,10 kg/s

Una vez conocidos estos valores y teniendo en cuenta los requisitos iniciales, se han calculado los caudales que deben circular por las turbinas cada mes (ver Tabla 14).

- En todos los meses mt1 debe valer como mínimo 2,6 kg/s, así que los meses de mayo, junio, julio y agosto, donde el caudal mínimo necesario para cubrir la demanda es menor, se impone este valor.
- El resto de meses se impone que mt3 sea igual a su mínimo valor, 1,10 Kg/s, para disminuir el calor cedido en el condensador.

En la Tabla 15 se calcula la variación de caudal que sufren las turbinas.

Tabla 14. Valores que cumplen los requisitos iniciales establecidos.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Q1 (kW)	6.351	6.606	6.718	6.194	684	1.070	706	671	5.834	6.000	6.515	5.987
Q2 (kW)	2.110	2.117	1.499	1.298	1.060	834	835	400	1.155	1.023	1.616	2.341
Qs (kW)	2.348	2.348	2.348	2.348	3.834	3.675	4.033	4.494	2.348	2.348	2.348	2.348
F (kW)	14.975	15.311	14.553	13.591	8.610	8.517	8.632	8.698	12.923	12.942	14.464	14.847
mt1 (kg/s)	5,01	5,13	4,90	4,56	2,60	2,60	2,60	2,60	4,33	4,34	4,86	4,94
mt2 (kg/s)	2,07	2,07	1,79	1,70	2,28	2,11	2,27	2,29	1,63	1,57	1,84	2,18
mt3 (kg/s)	1,10	1,10	1,10	1,10	1,80	1,72	1,89	2,11	1,10	1,10	1,10	1,10

Tabla 15. Variación del caudal con los valores que cumplen los requisitos.

	Caudal máximo	Caudal mínimo	Variación caudal
m1 (1ª turbina)	5,13	2,60	49%
m3 (2ª turbina)	2,29	1,57	31%
m4 (3ª turbina)	2,11	1,10	48%

El caudal de diseño de la primera turbina es de 5,13 kg/s, la de la segunda es de 2,29 kg/s y la de la tercera es de 2,11 kg/s.

Variación del rendimiento isoentrópico de la turbina con la carga:

Inicialmente se ha considerado que el rendimiento isoentrópico de la turbina permanece constante, $\eta_{st} = 0,80$, pero realmente este valor varía con el caudal circulante. Para tener en cuenta este hecho se ha supuesto que $\eta_{st} = 0,80$ cuando circula el caudal de diseño, y $\eta_{st} = 0,70$ cuando el caudal másico disminuye a la mitad.

Para calcular su valor cada mes, se va a suponer que el rendimiento isoentrópico varía linealmente con el caudal que circula por la turbina según la siguiente ecuación:

$$\eta_{st} = 0,80 - (0,10/(m_{\text{diseño}}/2)) \cdot (m_{\text{diseño}} - m)$$

Conociendo el caudal de diseño de cada una de las turbinas, se calcula como varía su rendimiento isoentrópico.

Tabla 16. Variación de la potencia y los caudales (rendimiento isoentrópico variable).

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Q1 (kW)	6.351	6.606	6.718	6.194	684	1.070	706	671	5.834	6.000	6.515	5.987
Q2 (kW)	2.110	2.117	1.499	1.298	1.060	834	835	400	1.155	1.023	1.616	2.341
Qs (kW)	2.418	2.408	2.444	2.458	3.927	3.787	4.122	4.567	2.477	2.466	2.444	2.399
F (kW)	14.991	15.321	14.576	13.601	8.616	8.525	8.638	8.703	12.943	12.941	14.488	14.837
Wneto (kW)	2.352	2.393	2.211	2.062	1.875	1.783	1.900	1.975	1.965	1.943	2.217	2.364
mt1 (kg/s)	5,010	5,130	4,900	4,560	2,600	2,600	2,600	2,600	4,330	4,340	4,860	4,940
mt2 (kg/s)	2,077	2,076	1,800	1,709	2,290	2,114	2,280	2,296	1,649	1,583	1,854	2,176
mt3 (kg/s)	1,111	1,107	1,117	1,120	1,809	1,737	1,901	2,114	1,126	1,120	1,118	1,103
η_{st1}	80%	80%	79%	78%	70%	70%	70%	70%	77%	77%	79%	79%
η_{st2}	78%	78%	76%	75%	80%	78%	80%	80%	74%	74%	76%	79%
η_{st3}	71%	70%	71%	71%	77%	76%	78%	80%	71%	71%	71%	70%

Si se compara la Tabla 16 con la Tabla 14, donde el rendimiento isoentrópico era constante, se observa que la energía por unidad de tiempo aportada por el combustible (F) y la energía térmica por unidad de tiempo cedida en el condensador han aumentado un poco, ya que el rendimiento del ciclo ha disminuido. Los caudales que circulan por la primera y la segunda turbina (mt1 y mt2 respectivamente) son los mismos, ya que la demanda mensual urbana e industrial no ha cambiado, y por tanto el caudal que se desvía hacia los intercambiadores para cubrir dicha demanda tampoco varía. Sin embargo al aumentar la energía por unidad de tiempo cedida en el condensador, el caudal que circula por éste también aumenta (mt3).

Análisis de sensibilidad de la presión y la temperatura del vapor vivo (P1 y T1):

Inicialmente se ha considerado que el vapor vivo tiene una temperatura de 450 °C y una presión de 60 bar. En la Tabla 17 se va a analizar qué es lo que ocurre en el mes de máxima demanda (febrero) y en el mes de mínima demanda (agosto) cuando estos valores cambian.

Como era de esperar, ya que aumenta la temperatura media de absorción de calor, al aumentar la temperatura y la presión del vapor vivo, aumenta el rendimiento eléctrico, el rendimiento eléctrico equivalente y la potencia neta del ciclo, tal y como se observa en la Tabla 17.

Análisis de sensibilidad de la demanda térmica que se puede cubrir en función de la disponibilidad de la biomasa residual agrícola herbácea:

Teniendo en cuenta la potencia que tiene la caldera cada mes (Tabla 16) y que la central permanecerá parada durante el mes de agosto para mantenimiento y una semana más para imprevistos (37 días al año), la central estará en funcionamiento 7.872 horas al año, y por tanto la energía requerida por la caldera será de 362.736 GJ al año, para poder cubrir la demanda disponible que se ha considerado en el apartado 3.1.

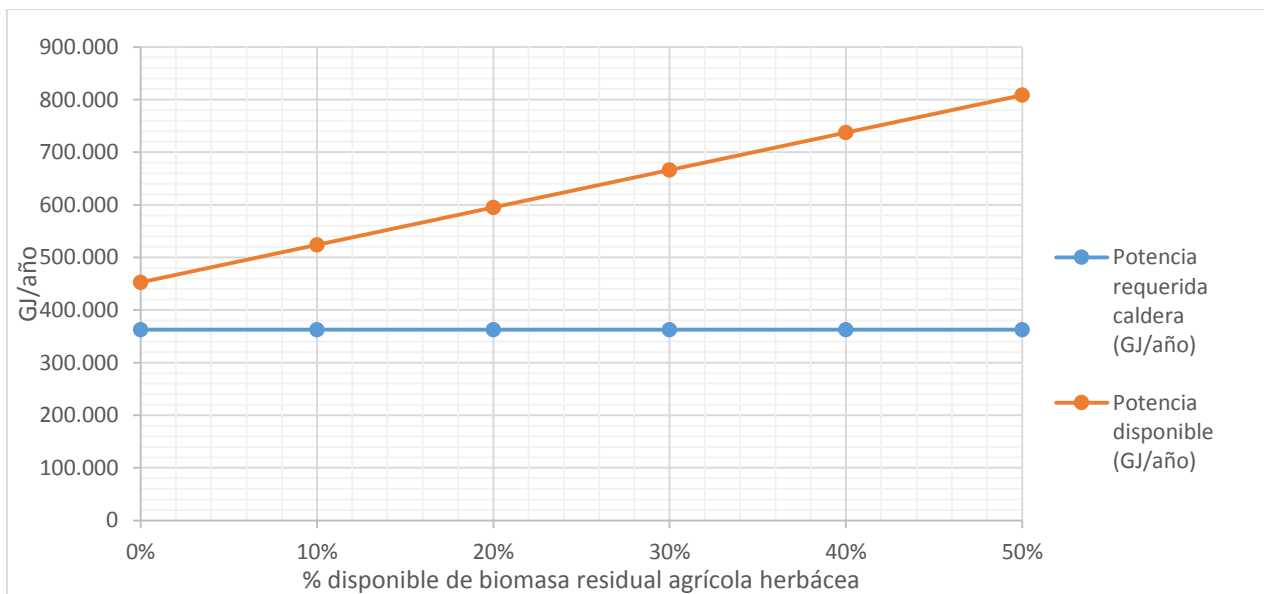
Inicialmente se ha considerado que se dispone del 50% de la biomasa procedente de residuos de cultivos herbáceos. Teniendo en cuenta este valor y la disponibilidad del resto de biomasa, en total se tiene una energía de 691.412 GJ (ver Tabla 10), que es muy superior a la requerida por la caldera.

Tabla 17. Variación de la temperatura y la presión del vapor vivo

FEBRERO (Máxima demanda)							AGOSTO (Mínima demanda)						
T1	P1	F	Qs	Wneto	REE	η ciclo	T1	P1	F	Qs	Wneto	REE	η ciclo
330	40	13.694	1.781	1.638	41%	12%	330	40	7.938	4.283	1.611	24%	20%
	50	13.455	1.508	1.690	45%	13%		50	7.846	4.178	1.631	25%	21%
	60	13.208	1.257	1.717	49%	13%		60	7.749	4.079	1.642	25%	21%
	70	12.948	1.016	1.723	53%	13%		70	7.645	3.984	1.642	25%	21%
	80	12.670	778	1.712	57%	14%		80	7.532	3.891	1.635	26%	22%
400	40	14.836	2.418	1.990	39%	13%	400	40	8.454	4.552	1.787	25%	21%
	50	14.668	2.182	2.066	42%	14%		50	8.393	4.463	1.817	25%	22%
	60	14.504	1.981	2.115	44%	15%		60	8.330	4.388	1.835	26%	22%
	70	14.342	1.803	2.143	46%	15%		70	8.267	4.319	1.845	26%	22%
	80	14.177	1.636	2.160	48%	15%		80	8.201	4.255	1.850	26%	23%
470	40	15.897	2.981	2.342	38%	15%	470	40	8.939	4.784	1.972	25%	22%
	50	15.763	2.756	2.437	40%	15%		50	8.893	4.703	2.007	26%	23%
	60	15.636	2.568	2.503	42%	16%		60	8.847	4.634	2.031	27%	23%
	70	15.513	2.405	2.550	44%	16%		70	8.801	4.574	2.048	27%	23%
	80	15.392	2.261	2.582	45%	17%		80	8.754	4.520	2.059	27%	24%
540	40	16.926	3.495	2.714	38%	16%	540	40	9.415	4.986	2.175	26%	23%
	50	16.813	3.277	2.819	40%	17%		50	9.378	4.912	2.212	27%	24%
	60	16.707	3.096	2.896	41%	17%		60	9.342	4.850	2.238	27%	24%
	70	16.606	2.941	2.954	43%	18%		70	9.305	4.796	2.257	28%	24%
	80	16.508	2.804	2.997	44%	18%		80	9.269	4.747	2.271	28%	25%

Sin embargo el valor de la disponibilidad de restos de cultivos herbáceos puede cambiar mucho de un año para otro, debido a que la variación en la producción interanual de estos cultivos es alta.

En la Gráfica 3 se compara la energía térmica anual requerida por la caldera (F) considerando inicialmente que se cubre el 50% de la demanda urbana, con la energía que se puede obtener de la biomasa en función de la disponibilidad de la biomasa residual agrícola herbácea.



Gráfica 3. Energía de los residuos de cultivos herbáceos en función de su disponibilidad.

En la Gráfica 3 se observa que se puede cubrir la energía requerida por la caldera en un año, independientemente de la disponibilidad de la biomasa residual agrícola herbácea.

Análisis de sensibilidad de la demanda térmica que se puede cubrir en función de la demanda urbana considerada:

Inicialmente se ha considerado que de la demanda urbana total se va a cubrir el 50%, ya que es razonable pensar que no todos los habitantes del municipio de Cariñena van a estar dispuestos a cambiar su instalación de calefacción. Sin embargo, este valor puede aumentar, y por eso se va a estudiar la capacidad de la instalación para cubrir este aumento de la demanda.

Si se tuviese que cubrir el 100% de la demanda urbana, la máxima potencia de la caldera se tendría en el mes de febrero (15,1 MW) y la mínima en el mes de junio (8,4 MW). En total la energía requerida por la caldera sería de 345.127 GJ al año, que es más pequeña que la que se puede obtener de la biomasa disponible, 691.412 GJ (ver Tabla 10)

De manera que no habría ningún problema si aumentase la demanda urbana, mientras la biomasa disponible no disminuya considerablemente.

3.4.2. Análisis de las características de la instalación, considerando que el sistema de calefacción de los usuarios es a través de suelo radiante.

Este análisis también se ha realizado a través del programa EES con los mismos datos iniciales, salvo la temperatura del segundo intercambiador, que en este caso es de 80 °C.

Análisis de los caudales de diseño de la instalación:

En la Tabla 18 aparecen los valores finales de los caudales de diseño. Para obtenerlos se ha utilizado la misma metodología que en el caso anterior, pero con los nuevos valores iniciales.

Los caudales de diseño de las turbinas apenas varían con respecto al caso anterior. En la Tabla 18 se observa que la energía por unidad de tiempo requerida en la caldera (F) es algo mayor y el calor por unidad de tiempo cedido en el condensador (Qs) ha disminuido un poco, pero el resto de variables son prácticamente iguales.

En la Tabla 19 se calcula la variación de caudal que sufren las turbinas, y se comprueba que cumple el requisito de ser menor del 50%.

En la Tabla 20 se compara la potencia neta del ciclo y el rendimiento eléctrico equivalente en las dos opciones consideradas (sistema de calefacción con radiadores y con suelo radiante). La disminución de la temperatura requerida en el segundo intercambiador, provoca que el trabajo neto del ciclo aumente considerablemente. Este aumento, a pesar de que también lo hace la energía por unidad de tiempo requerida en la caldera, hace que rendimiento eléctrico equivalente también aumente, aunque muy poco.

Tabla 18. Valores que cumplen los requisitos iniciales establecidos

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Q1 (kW)	6.351	6.606	6.718	6.194	684	1.070	706	671	5.834	6.000	6.515	5.987
Q2 (kW)	2.110	2.117	1.499	1.298	1.060	834	835	400	1.155	1.023	1.616	2.341
Qs (kW)	2.563	2.563	2.563	2.563	3.834	3.675	4.034	4.497	2.563	2.563	2.563	2.563
F (kW)	15.445	15.781	14.986	14.012	8.667	8.561	8.677	8.720	13.336	13.347	14.905	15.331
mt1 (kg/s)	5,11	5,23	5,00	4,66	2,60	2,60	2,60	2,60	4,43	4,45	4,96	5,05
mt2 (kg/s)	2,17	2,18	1,89	1,80	2,28	2,11	2,27	2,29	1,73	1,67	1,95	2,28
mt3 (kg/s)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,80	1,72	1,89	2,11	1,20	1,20	1,20	1,20

Tabla 19. Variación del caudal con los valores que cumplen los requisitos iniciales establecidos

	Caudal máximo	Caudal mínimo	Variación caudal
m1 (1ª turbina)	5,231	2,600	50%
m3 (2ª turbina)	2,290	1,672	27%
m4 (3ª turbina)	2,105	1,200	43%

Tabla 20. Variación del trabajo neto y del rendimiento eléctrico equivalente del ciclo

Calefacción con radiadores (T_intercamb2 = 105 °C)												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Wneto (kW)	2.352	2.393	2.211	2.062	1.875	1.783	1.900	1.975	1.965	1.943	2.217	2.364
REE	42,1%	42,5%	40,6%	39,1%	28,1%	27,8%	27,4%	26,3%	38,0%	37,8%	40,7%	42,3%
Calefacción con suelo radiante (T_intercamb2 = 80 °C)												
Wneto (kW)	2.551	2.594	2.372	2.216	1.926	1.820	1.938	1.988	2.109	2.085	2.385	2.585
REE	42,2%	42,6%	40,5%	38,9%	28,6%	28,2%	27,8%	26,4%	37,8%	37,5%	40,6%	42,5%

3.5. Selección de la alternativa a considerar.

Entre las dos opciones que se han estudiado, en el caso del CEIS de Cariñena la mayoría de los usuarios del municipio disponen de radiadores como sistema de calefacción, como ya se ha explicado.

El sistema de calefacción con radiadores tiene un rendimiento eléctrico equivalente menor, como se observa en la Tabla 20, en comparación con el suelo radiante. Sin embargo esta disminución es muy pequeña, y no compensa el elevado coste de inversión que supondría cambiar las instalaciones de calefacción de los usuarios del municipio.

Por este motivo la opción que se ha seleccionado y la que se va a utilizar en los próximos análisis, es la de calefacción con radiadores.

4. Análisis económico.

A continuación se va a realizar un análisis económico para estudiar la rentabilidad del proyecto. En primer lugar se va a calcular los costes de inversión y de operación que se deben afrontar todos los años, y los ingresos que se obtienen por la venta de energía.

Debido a la variabilidad del mercado y de la normativa que rige cómo debe comercializarse la energía, se va a realizar un análisis de sensibilidad y así poder determinar, para diferentes precios de compra de la biomasa (€/ton), cuál debe ser el valor del precio de venta de la electricidad y del calor (€/kWh), para que el proyecto resulte rentable. De esta manera se podrá saber si para las condiciones de venta establecida en cada momento, el proyecto es rentable o no.

4.1. Costes de Inversión

Para calcular la inversión se ha supuesto que para poner en marcha una central de cogeneración como la aquí propuesta es necesario realizar una inversión de 4.000 €/kW eléctrico neto instalado (potencia bruta de las turbinas menos la potencia de las bombas y menos un 10% de autoconsumos).

La potencia de diseño (máxima potencia en el mes de febrero) es de 2.394 kW.

Tabla 21. Inversión inicial

INVERSIÓN		
Coste específico	Potencia eléctrica	Coste
€/kW.	kW.	€
4.000,00 €	2.394	9.576.000 €

Respecto a la financiación del proyecto, se va a suponer que se pide un préstamo a 10 años por el 70% del total de la inversión (6.703.200 €), mientras que el resto es cubierto con recursos propios de la empresa.

4.2. Costes de operación y mantenimiento

Los costes que se deben afrontar anualmente son:

- Gastos de personal: se han calculado como el sueldo bruto que recibe el trabajador anualmente, más la seguridad social, que supone un 30% de dicho sueldo bruto.

Tabla 22. Gastos de personal

COSTE PERSONAL			
	Personal	Sueldo Bruto	Coste anual
Gerente	1	42.000	54.600
Jefe de planta	1	39.000	50.700
Ingeniero	1	36.000	46.800
Administrativo	1	30.000	39.000
Operarios	7	24.000	218.400
Coste anual		171.000	389.700

- Compra de biomasa: considerando que el precio de la biomasa es de 50 €/tonelada. Posteriormente se realizará un análisis de sensibilidad donde se estudia la rentabilidad del proyecto en función del precio de la biomasa.
- Operación y mantenimiento: se ha supuesto que la operación y el mantenimiento de una central de cogeneración como la aquí propuesta supone unos gastos anuales de 50 €/kW eléctrico neto instalado (2.394 kW).

En la Tabla 23 se muestra un resumen de los gastos anuales de operación y mantenimiento.

Tabla 23. Gastos anuales

GASTOS	
Coste biomasa	1.967.892 €
Biomasa (t)	39.358
Precio (€/t)	50,00 €
Operación y mantenimiento	119.650 €
Personal	389.700 €
Operarios	218.400 €
Gerente	54.600 €
Jefe de planta	36.000 €
Ingenieros	50.700 €
Administrativo	30.000 €
TOTAL	3.320.625 €

4.3. Ingresos.

Para calcular los ingresos anuales, se debe conocer cuánta energía eléctrica mensual se produce y cuánta energía térmica se proporciona a los usuarios.

En la Tabla 24 se muestra la producción anual de energía térmica y eléctrica.

Tabla 24. Producción de energía anual

	CALOR			ELECTRICIDAD	
	Qind (kW)	Qurb (kW)	Qttotal (kWh)	Wneto (kW)	Wneto (kWh)
Enero	6.351	2.110	6.294.949	2.352	1.749.888
Febrero	6.606	2.117	6.280.129	2.393	1.722.960
Marzo	6.718	1.499	6.113.685	2.211	1.644.984
Abril	6.194	1.298	5.394.425	2.062	1.484.640
Mayo	684	1.060	1.297.416	1.875	1.395.000
Junio	1.070	834	1.370.656	1.783	1.283.760
Julio	706	835	1.146.491	1.900	1.413.600
Agosto	671	400	797.254	1.975	1.469.400
Septiembre	5.834	1.155	5.032.058	1.965	1.414.800
Octubre	6.000	1.023	5.224.944	1.943	1.445.592
Noviembre	6.515	1.616	5.854.260	2.217	1.596.240
Diciembre	5.987	2.341	6.195.870	2.364	1.758.816
	TOTAL		51.002.136	TOTAL	18.379.680

Una vez conocida la energía total producida (kWh), se calculan los ingresos multiplicando dicho valor por el precio de la energía.

El precio del calor y de la electricidad se determinan en el posterior análisis de sensibilidad.

4.4. Análisis de sensibilidad

Se analiza, para diferentes precios de compra de la biomasa (€/ton), el precio (€/kWh) del calor y la electricidad necesario para que el proyecto resulte rentable. Se considera que el proyecto es rentable cuando el TIR > 8% (VAN > 0).

En la Gráfica 4 se muestra el análisis de sensibilidad realizado, considerando los costes del apartado 4.1 y 4.2.

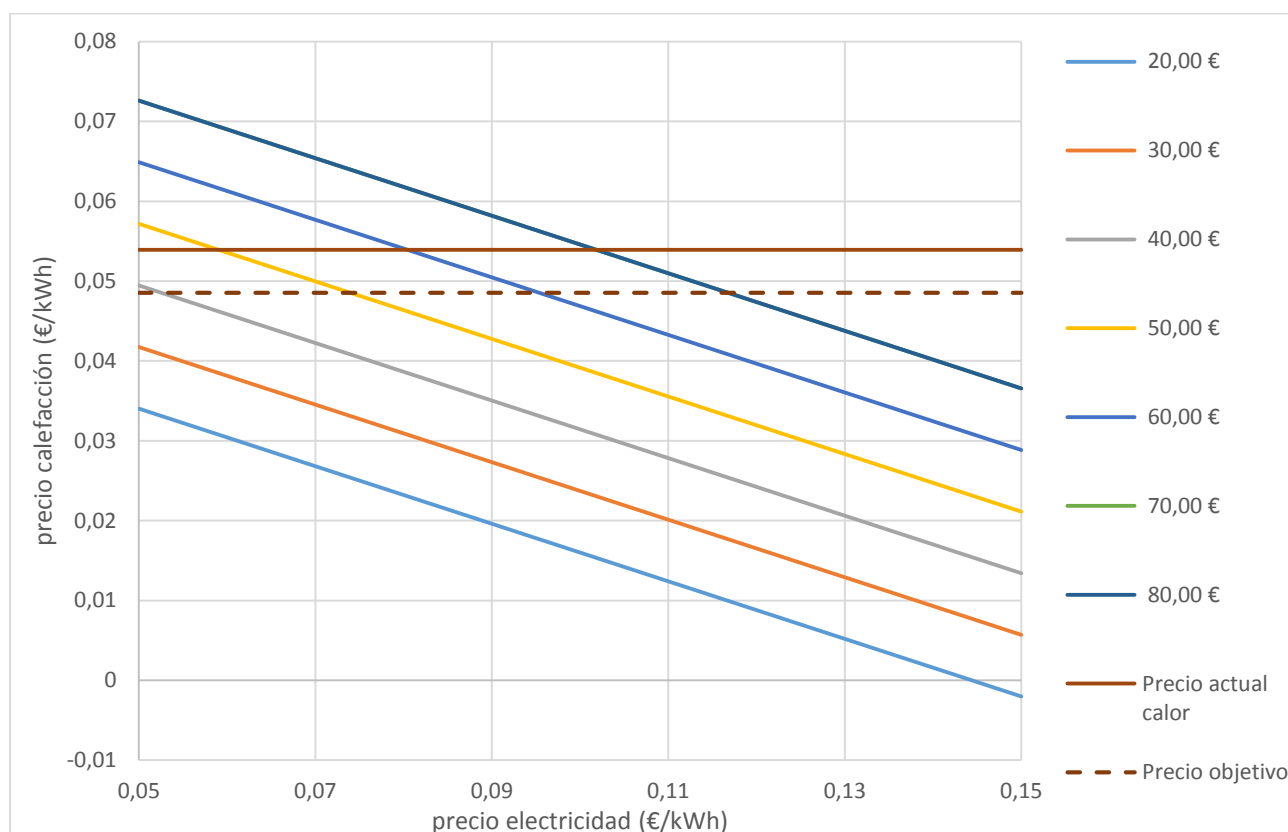
Actualmente, por el consumo de gas natural para calefacción, los clientes que tienen contratada la tarifa TUR2 (Tarifas de último recurso, para consumo superior a 5.000 kWh/año e inferior o igual a 50.000 kWh/año), están pagando un término variable de 4,846 c€/kWh y un término fijo de 8,84 (€/cliente)/ mes [14]. Esta tarifa se aplica a viviendas con calefacción de gas natural, como ocurre en este caso.

Por el termino fijo de la tarifa, cada vivienda está pagando 106,08 € (8,84 (€/cliente)/ mes ·12) al año. Para calcular cuánto supone este coste en función de la energía consumida, se ha estimado la demanda térmica media anual de una vivienda en Cariñena, donde actualmente hay 1.130 viviendas con calefacción [1]. Conociendo la demanda energética del municipio (ver Tabla 7), se ha calculado que la demanda térmica media de una vivienda es de 19.420 kWh. Por lo tanto cada usuario debe pagar de media 0,0055 €/kWh por el término fijo.

Considerando este término fijo y el termino variable de la tarifa, los usuarios deben pagar aproximadamente 0,0539 €/kWh por el consumo de calefacción, que es el valor del precio actual que aparece en la Gráfica 4.

Para beneficiar a los usuarios que consuman la energía térmica de la central de cogeneración, se les va a ofrecer una reducción del 10% sobre el precio que están pagando actualmente, es decir, se les venderá el calor a 0,0485 €/kWh. Se considera que éste también es el precio al que se va a vender el calor a las industrias y bodegas (precio objetivo de la Gráfica 4).

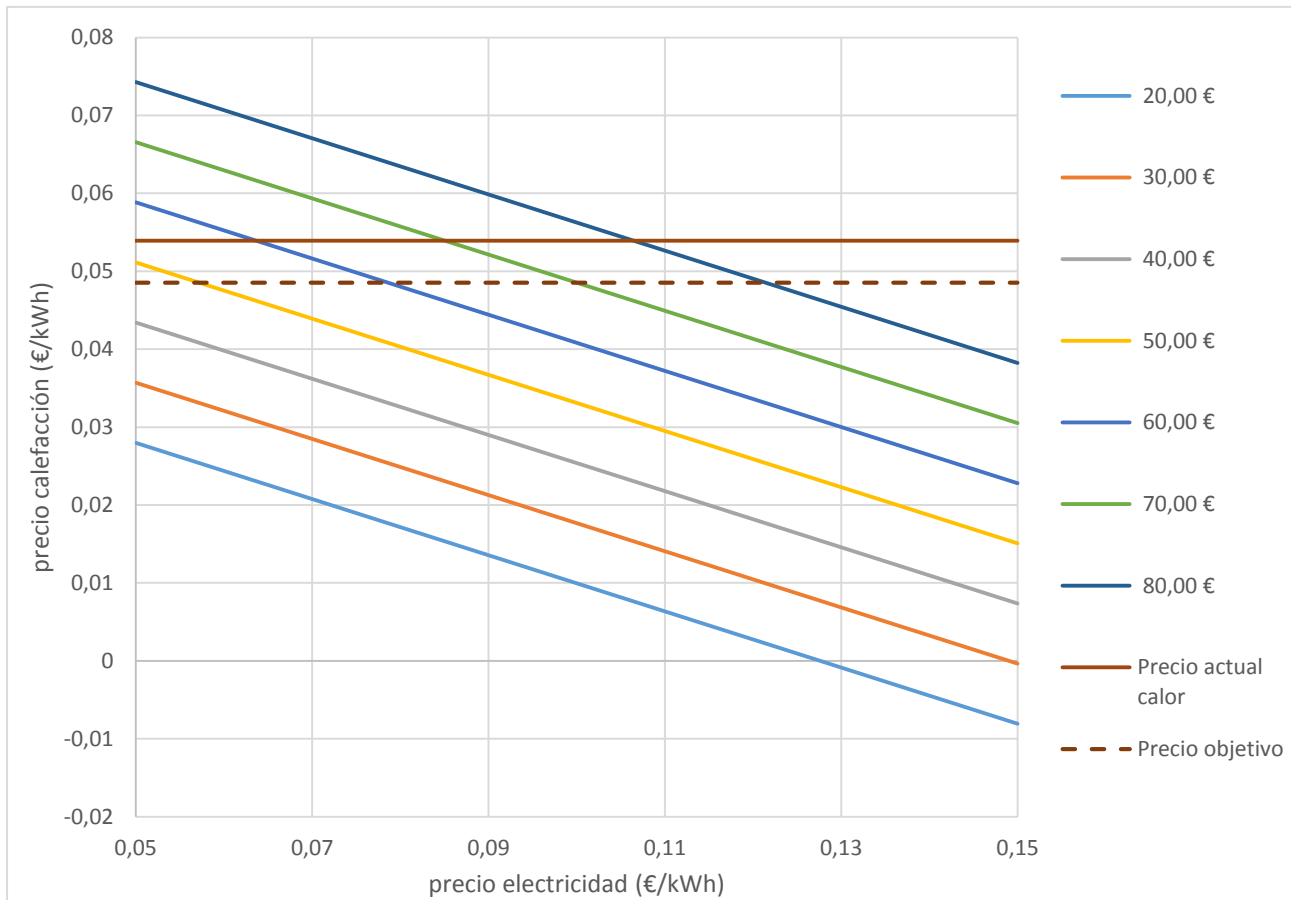
El precio de venta de la electricidad se considera que varía desde los 0,05 €/kWh, que se aproxima al precio actual de venta de la electricidad en el mercado [15] sin prima, hasta los 0,15 €/kWh, que es el precio al que se vendería la electricidad considerando una prima de 0,10 €/kWh.



Gráfica 4. Valor del precio de la electricidad y el calor

Como se observa en la Gráfica 4, cuando el precio de la biomasa es inferior a 40 €/ton y la electricidad se vende sin prima, la energía térmica se puede vender al precio objetivo (0,0485 €/kWh), para que el proyecto resulte rentable. Sin embargo, si la biomasa se compra más cara, para poder vender la energía térmica a ese precio, solo sería económicamente viable si existiera una prima en la venta de la electricidad.

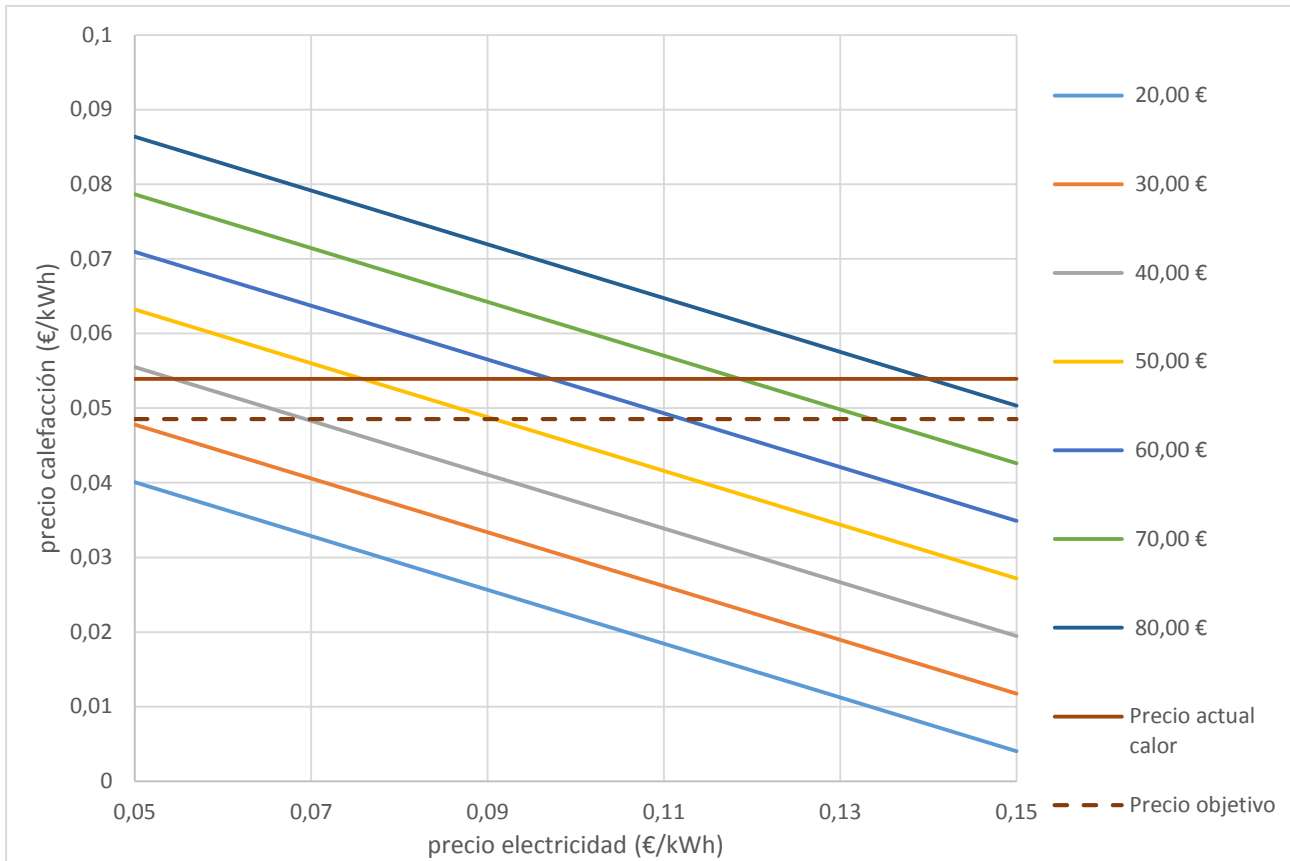
En la Gráfica 5 se realiza el mismo análisis, pero se considera que para poner en marcha una central de cogeneración es necesario realizar una inversión de 3.000 €/kW eléctrico.



Gráfica 5. Valor del precio de la electricidad y el calor

Evidentemente, este caso es más favorable, y como se observa en la Gráfica 5, cuando el precio de la biomasa es igual o inferior a 40 €/ton y la electricidad se vende sin prima, el precio de venta de la energía térmica puede ser igual o inferior al valor objetivo (0,0485 €/kWh), para que el proyecto resulte rentable. Además, en este caso, si el precio de la biomasa es de 50 €/ton y la electricidad se vende sin prima, el precio de venta de la energía térmica puede venderse a un precio inferior del que tiene actualmente, pero con una reducción menor del 10%. En las demás situaciones, si la biomasa se compra más cara, para poder vender la energía térmica al precio objetivo, debería existir una prima en la venta de la electricidad.

En la Gráfica 6 se realiza el mismo análisis, pero se considera que para poner en marcha una central de cogeneración es necesario realizar una inversión de 5.000 €/kW eléctrico, que es el caso más desfavorable de los contemplados.



Gráfica 6. Valor del precio de la electricidad y el calor

En este caso para poder vender la electricidad sin prima y la energía térmica al precio objetivo (0,0485 €/kWh), la biomasa se debe comprar a un precio igual o inferior a 30 €/ton, para que el proyecto resulte rentable. En las demás situaciones, donde la biomasa se compra más cara, para poder vender la energía térmica al precio objetivo y que el proyecto resulte económicamente viable, tendría que existir una prima en la venta de la electricidad.

5. Conclusiones

El principal objetivo de este trabajo ha sido analizar y comprobar la viabilidad de la central de cogeneración que se instalará en Cariñena y que utilizará biomasa de la zona, desde un punto de vista técnico y económico.

Después de analizar los recursos disponibles locales, se concluye que hay suficiente biomasa para cubrir la demanda energética, ya que la energía que se puede obtener de la biomasa disponible (691.412 GJ) es mayor que la energía requerida por la central de cogeneración (362.736 GJ) para cubrir la demanda industrial y el 50% de la demanda urbana. Incluso si la demanda urbana aumentase al 100%, se podría cubrir sin problemas con la biomasa disponible.

Otro aspecto importante que se debe tener en cuenta, es la disponibilidad de los residuos de cultivos herbáceos, ya que puede cambiar mucho de un año para otro, debido a que la variación en la producción y demanda externa interanual de estos cultivos es alta. Tras realizar un análisis de sensibilidad, donde se compara la demanda térmica que se puede cubrir en función de la disponibilidad de este tipo de biomasa, se concluye que se puede cubrir la energía requerida, independientemente de la disponibilidad de la biomasa residual agrícola herbácea (ver Gráfica 3).

En cuanto al análisis de las características de la instalación, se han considerado dos opciones en función del sistema de calefacción de los usuarios: a través de radiadores o suelo radiante. Entre estas opciones finalmente se ha seleccionado el sistema de calefacción con radiadores, ya que en el caso de Cariñena la mayoría de los usuarios del municipio disponen de este sistema de calefacción, y así no es necesario realizar costosos cambios en las instalaciones de las viviendas.

Considerando la opción seleccionada, la central de cogeneración que se ha diseñado tiene una potencia eléctrica de diseño de 2.660 kW y una caldera de 15.321 kW. Tanto el rendimiento eléctrico, como el rendimiento eléctrico equivalente varían a lo largo del año, ya que cada mes se produce una cantidad distinta de electricidad y calor para satisfacer la demanda. El máximo rendimiento eléctrico es del 22% (agosto) y el máximo rendimiento eléctrico equivalente es del 43% (febrero).

Después de realizar el análisis económico considerando diferentes escenarios, en el caso particular donde es necesario realizar una inversión de 4.000 €/kW eléctrico, se concluye que, para que el proyecto resulte rentable, si la energía térmica se vende ofreciendo una reducción a los usuarios sobre lo que están pagando actualmente, y la electricidad se vende sin prima, el coste de compra de la biomasa debe ser inferior de 40 €/ton. Si la biomasa se compra más cara, para poder vender la energía térmica al precio objetivo, tendría que existir una prima en la venta de la electricidad. Por supuesto, si disminuye la inversión, aumenta el precio de la biomasa por debajo del cual el proyecto resulta rentable, y ocurre lo contrario si aumenta la inversión.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones y conclusiones que se han expuesto anteriormente, se puede concluir que, tanto desde el punto de vista de los recursos disponibles, como de la viabilidad técnica y económica, el proyecto es factible.

6. Referencias

- [1] Instituto Aragonés de Estadística. Información obtenida de la base de datos de IAEST. Disponible en: <http://www.aragon.es/iaest>. Acceso en octubre de 2014.
- [2] Denominación de Origen Cariñena. Información obtenida de la base de datos de DOC. Disponible en: <http://www.docarinena.com/>. Acceso junio 2015.
- [3] Gobierno de Aragón. Departamentos de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente (2014). "Superficies de cultivos de Aragón declaradas en la PAC de 2013 y 2014". Comunicación privada.
- [4] Gobierno de Aragón. Departamento de Gestión Forestal (2010). "Superficies forestales" a partir del 3º Mapa Forestal de España. Comunicación privada.
- [5] Gobierno de Aragón. Departamento de Industria e Innovación (2013). "Boletín Nº 27 de coyuntura energética en Aragón".
- [6] Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos – CIRCE (2006). "Evaluación del potencial de biomasa residual en los ecosistemas forestales y los medios agrícolas en la provincia de Huesca". Beca de investigación Félix de Azara.
- [7] Alvaro Feliu Jofre y Lluís Otero Massa (2007). "Recuperación Energética Ecoeficiente de Residuos. Potencial en España". Fundación Gas Natural.
- [8] Centro de Desarrollo de Energías Renovables –CEDER. Información obtenida de la base de datos BIORAISE. Disponible en: <http://bioraise.ciemat.es/Bioraise/>. Acceso en noviembre de 2014.
- [9] Pedro Martínez Ruiz (2003). "Estudio de la biomasa residual vegetal (leñosa y herbácea) de la actividad agrícola". Diputación de Salamanca, Unión Europea (FEDER - PROYECTO POCTEP II - CE - 0456_RETALER_II_6_E)
- [10] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE (2007). "Energía de la Biomasa". Asociación de Periodistas de Información Ambiental (APIA). Serie "Manuales de Energías Renovables".
- [11] BOE nº74 Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo (2006). "Documento Básico HE Ahorro de Energía del Código Técnico".
- [12] Michael J. Moran, Howard N. Shapiro (2004). "Fundamentos de termodinámica técnica". Editorial Reverte.
- [13] Centro de Estudios de la Energía Solar. Información obtenida de la base de datos de CENSOLAR. Disponible en: [http://www.censolar.es/ %20.htm](http://www.censolar.es/%20.htm). Acceso en octubre de 2014.

- [14] BOE nº315, Resolución de 26 de diciembre de 2014, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se publica la tarifa de último recurso de gas natural.
- [15] Operador del Mercado Ibérico de Energía, Polo Español, S. A. Información obtenida de la base de datos de OMIE. Disponible en:
<http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>. Acceso en junio de 2015.

ANEXO

A continuación se expone el código generado en EES para el diseño del ciclo térmico de la central de cogeneración, en los dos casos considerados.

// 1- DATOS INICIALES:

```
T_industrial=Temperature(Steam;P=8;x=1)+10 {°C}
T_urbana=85+10 {°C}      {En el caso de sistema de calefacción a través de radiadores}
// T_urbana=60+10 {°C}    {En el caso de sistema de calefacción a través de suelo radiante}
```

```
T_1=450 {°C}
P_1=60 {bar}
P_4=0,1 {dato nuestro de la presión de baja}
m_1=5,13 {Kg/s}          {Cambia cada mes}
```

```
x_5=0
x_7=0
x_10=0
mu_st_diseño=0,80
mu_sb=0,75
mu_caldera=0,90
```

```
m_1_diseño=5,13
m_3_diseño=2,29
m_4_diseño=2,11
```

```
mu_st1=mu_st_diseño-(0,1/(m_1_diseño/2))*(m_1_diseño-m_1)
mu_st2=mu_st_diseño-(0,1/(m_3_diseño/2))*(m_3_diseño-m_3)
mu_st3=mu_st_diseño-(0,1/(m_4_diseño/2))*(m_4_diseño-m_4)
```

//2- ESTADOS DE LA INSTALACIÓN

// Estado 1: Antes de la primera turbina

```
h_1=Enthalpy(Steam;T=T_1;P=P_1)
s_1=Entropy(Steam;T=T_1;P=P_1)
x_1=Quality(Steam;P=P_1;T=T_1)
```

// Estado 2: Después de la primera turbina

```
m_T1=m_1
m_2=m_1
T_intercambio1=T_industrial+10
P_2=Pressure(Steam;T=T_intercambio1;x=1)
s_2s=s_1
h_2s=Enthalpy(Steam;P=P_2;s=s_2s)
mu_st1=(h_1-h_2)/(h_1-h_2s)
T_2=Temperature(Steam;P=P_2;h=h_2)
s_2=Entropy(Steam;P=P_2;h=h_2)
x_2=Quality(Steam;P=P_2;h=h_2)
```

// Estado 3: Después de la segunda turbina

```
m_T2=m_3
T_intercambio2=T_urbana+10
P_3=Pressure(Steam;T=T_intercambio2;x=1)
s_3s=s_2
h_3s=Enthalpy(Steam;P=P_3;s=s_3s)
mu_st2=(h_2-h_3)/(h_2-h_3s)
T_3=Temperature(Steam;P=P_3;h=h_3)
s_3=Entropy(Steam;P=P_3;h=h_3)
```

// Estado 4: Después de la tercera turbina

```
m_T3=m_4
s_4s=s_3
h_4s=Enthalpy(Steam;P=P_4;s=s_4s)
mu_st3=(h_3-h_4)/(h_3-h_4s)
T_4=Temperature(Steam;P=P_4;h=h_4)
s_4=Entropy(Steam;P=P_4;h=h_4)
```

//Estado 5: Después del condensador

```
m_c=m_4
m_5=m_4
P_5=P_4
T_5=Temperature(Steam;P=P_5;x=x_5)
h_5=Enthalpy(Steam;P=P_5;x=x_5)
s_5=Entropy(Steam;P=P_5;x=x_5)
```

// Estado 6: Después de la tercera bomba

```
m_6=m_4
x_6=0
P_6=P_7 {Consideramos que en el punto de mezcla las presiones son iguales}
s_6s=s_5
mu_sb=(h_6s-h_5)/(h_6-h_5)
h_6s=Enthalpy(Steam;s=s_6s;P=P_6)
T_6=Temperature(Steam;P=P_6;h=h_6)
```

//Estado 7: Después del segundo intercambiador

```
m_b=m_7
m_7=m_3-m_4
T_7=T_urbana+10
P_7=Pressure(Steam;T=T_7;x=x_7)
h_7=Enthalpy(Steam;T=T_7;x=x_7)
s_7=Entropy(Steam;T=T_7;x=x_7)
```

// Estado 8: Después del segundo punto de mezcla.

```
m_8=m_6+m_7
P_8=P_6 {Consideramos que en el punto de mezcla las presiones son iguales}
{para calcular h8 se hace un balance de masas y energía para hallar la temperatura mezcla
balance de masa      m_8=m_6+m_7
balance de energia   m_7*h_7+m_6*h_6=m_8*h_8}
m_7*h_7+m_6*h_6=m_8*h_8
s_8=Entropy(Steam;h=h_8;P=P_8)
x_8=Quality(Steam;P=P_8;h=h_8)
T_8=Temperature(Steam;P=P_8;h=h_8)
```

// Estado 9: Después de la segunda bomba

```
m_9=m_8
x_9=0
P_9=P_10 {Consideramos que en el punto de mezcla las presiones son iguales}
s_9s=s_8
h_9=h_8+(h_9s-h_8)/mu_sb
h_9s=Enthalpy(Steam;s=s_9s;P=P_9)
T_9=Temperature(Steam;P=P_9;h=h_9)
```

// Estado 10: Después del primer intercambiador

```
m_a=m_10
m_10=m_2-m_3
P_10=P_2
```



```

h_10=Enthalpy(Steam;P=P_10;x=x_10)
s_10=Entropy(Steam;P=P_10;x=x_10)
T_10=Temperature(Steam;P=P_10;x=x_10)

```

// Estado 11: Después del primer punto de mezcla.

```

m_11=m_1
P_11=P_10 {Consideramos que en el punto de mezcla las presiones son iguales}
{para calcular h11 haremos un balance de masas y energía para hallar la temperatura mezcla}
balance de masa      m_11=m_10+m_9
balance de energía  m_9*h_9+m_10*h_10=m_11*h_11
m_10*h_10+m_9*h_9=m_11*h_11
s_11=Entropy(Steam;h=h_11;P=P_11)
x_11=Quality(Steam;P=P_11;h=h_11)
T_11=Temperature(Steam;P=P_11;h=h_11)

```

// Estado 12: Después de la primera bomba

```

m_12=m_1
x_12=0
P_12=P_1
s_12s=s_11
h_12=h_11+(h_12s-h_11)/mu_sb
h_12s=Enthalpy(Steam;s=s_12s;P=P_12)
T_12=Temperature(Steam;P=P_12;h=h_12)

```

//3- BALANCES de ENERGÍA

//Calor por unidad de tiempo a la caldera (Qe).

0=Q_e+m_1*(h_12-h_1) {kJ/s}

//Energía del combustible por unidad de tiempo (F)

F=Q_e/mu_caldera

//Calor por unidad de tiempo que se obtiene en los intercambiadores (Q1 y Q2).

0=Q_1+m_10*(h_2-h_10) {kJ/s}

Q_1=-6606

0=Q_2+m_7*(h_3-h_7) {kJ/s}

Q_2=-2117

//Calor por unidad de tiempo que sale del condensador (Qs).

0=Q_s+m_5*(h_4-h_5) {kJ/s}

//Q_s=-0

//Potencia que se obtiene de las turbinas.

W_t1=m_1*(h_1-h_2) {kW}

W_t2=m_3*(h_2-h_3) {kW}

W_t3=m_4*(h_3-h_4) {kW}

W_t=W_t1+W_t2+W_t3

//Potencia que consumen las bombas.

W_b1=m_5*(h_5-h_6) {kW}

W_b2=m_8*(h_8-h_9) {kW}

W_b3=m_11*(h_11-h_12) {kW}

W_b=W_b1+W_b2+W_b3

//4- POTENCIA del CICLO

W_NETO=(W_t+W_b)*0,90

//5- RENDIMIENTO CICLO

mu_CICLO=W_NETO/F

//6-RENDIMIENTO ELECTRICO EQUIVALENTE

mu_ee=W_neto/(F-((-Q_1-Q_2)/mu_caldera))

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el EES para cada uno de los casos considerados, en el mes de febrero (mes de máxima demanda térmica) y en el mes de agosto (mes de mínima demanda térmica)

Resultados considerando que el sistema de calefacción de los usuarios es a través de radiadores.

Febrero

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg

F = 15320	$h_1 = 3302$	$h_{10} = 809,6$	$h_{11} = 607,3$	$h_{12} = 614,2$	$h_{12s} = 612,5$
$h_2 = 2973$	$h_{2s} = 2891$	$h_3 = 2615$	$h_{3s} = 2525$	$h_4 = 2326$	$h_{4s} = 2254$
$h_5 = 191,8$	$h_6 = 192$	$h_{6s} = 191,9$	$h_7 = 440,2$	$h_8 = 308,4$	$h_9 = 309,9$
$h_{9s} = 309,5$	$\mu_{\text{caldera}} = 0,9$	$\mu_{\text{CICLO}} = 0,1593$	$\mu_{\text{ee}} = 0,4337$	$\mu_{\text{sb}} = 0,75$	$\mu_{\text{st,diseño}} = 0,8$
$m_1 = 5,13$	$m_{10} = 3,054$	$m_{11} = 5,13$	$m_{12} = 5,13$	$m_2 = 5,13$	$m_3 = 2,076$
$m_4 = 1,103$	$m_5 = 1,103$	$m_6 = 1,103$	$m_7 = 0,9735$	$m_8 = 2,076$	$m_9 = 2,076$
$m_a = 3,054$	$m_b = 0,9735$	$m_c = 1,103$	$m_{T1} = 5,13$	$m_{T2} = 2,076$	$m_{T3} = 1,103$
$P_1 = 60$	$P_{10} = 12,66$	$P_{11} = 12,66$	$P_{12} = 60$	$P_2 = 12,66$	$P_3 = 1,208$
$P_4 = 0,1$	$P_5 = 0,1$	$P_6 = 1,208$	$P_7 = 1,208$	$P_8 = 1,208$	$P_9 = 12,66$
$Q_1 = -6606$	$Q_2 = -2117$	$Q_e = 13788$	$Q_s = -2353$	$s_1 = 6,72$	$s_{10} = 2,24$
$s_{11} = 1,781$	$s_{12s} = 1,781$	$s_2 = 6,877$	$s_{2s} = 6,72$	$s_3 = 7,114$	$s_{3s} = 6,877$
$s_4 = 7,34$	$s_{4s} = 7,114$	$s_5 = 0,6493$	$s_{6s} = 0,6493$	$s_7 = 1,363$	$s_8 = 0,9992$
$s_{9s} = 0,9992$	$T_1 = 450$	$T_{10} = 190,4$	$T_{11} = 144,1$	$T_{12} = 145$	$T_2 = 268,2$
$T_3 = 105$	$T_4 = 45,82$	$T_5 = 45,82$	$T_6 = 45,83$	$T_7 = 105$	$T_8 = 73,65$
$T_9 = 73,8$	$T_{\text{industrial}} = 180,4$	$T_{\text{intercambio1}} = 190,4$	$T_{\text{intercambio2}} = 105$	$T_{\text{urbana}} = 95$	$W_b = -38,45$
$W_{b1} = -0,1646$	$W_{b2} = -3,25$	$W_{b3} = -35,04$	$W_{\text{NETO}} = 2441$	$W_t = 2750$	$W_{t1} = 1688$
$W_{t2} = 743,6$	$W_{t3} = 318,5$	$x_1 = 100$	$x_{10} = 0$	$x_{11} = -100$	$x_{12} = 0$
$x_2 = 100$	$x_5 = 0$	$x_6 = 0$	$x_7 = 0$	$x_8 = -100$	$x_9 = 0$

Agosto

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg

$F = 8698$	$h_1 = 3302$	$h_{10} = 809,6$	$h_{11} = 284,6$	$h_{12} = 291$	$h_{12s} = 289,4$
$h_2 = 2973$	$h_{2s} = 2891$	$h_3 = 2615$	$h_{3s} = 2525$	$h_4 = 2326$	$h_{4s} = 2254$
$h_5 = 191,8$	$h_6 = 192$	$h_{6s} = 191,9$	$h_7 = 440,2$	$h_8 = 211,9$	$h_9 = 213,5$
$h_{9s} = 213,1$	$\mu_{caldera} = 0,9$	$\mu_{CICLO} = 0,2342$	$\mu_{ee} = 0,2713$	$\mu_{sb} = 0,75$	$\mu_{st,diseño} = 0,8$
$m_1 = 2,6$	$m_{10} = 0,3102$	$m_{11} = 2,6$	$m_{12} = 2,6$	$m_2 = 2,6$	$m_3 = 2,29$
$m_4 = 2,106$	$m_5 = 2,106$	$m_6 = 2,106$	$m_7 = 0,1839$	$m_8 = 2,29$	$m_9 = 2,29$
$m_a = 0,3102$	$m_b = 0,1839$	$m_c = 2,106$	$m_{T1} = 2,6$	$m_{T2} = 2,29$	$m_{T3} = 2,106$
$P_1 = 60$	$P_{10} = 12,66$	$P_{11} = 12,66$	$P_{12} = 60$	$P_2 = 12,66$	$P_3 = 1,208$
$P_4 = 0,1$	$P_5 = 0,1$	$P_6 = 1,208$	$P_7 = 1,208$	$P_8 = 1,208$	$P_9 = 12,66$
$Q_1 = -671$	$Q_2 = -400$	$Q_e = 7828$	$Q_s = -4494$	$s_1 = 6,72$	$s_{10} = 2,24$
$s_{11} = 0,9266$	$s_{12s} = 0,9266$	$s_2 = 6,877$	$s_{2s} = 6,72$	$s_3 = 7,114$	$s_{3s} = 6,877$
$s_4 = 7,34$	$s_{4s} = 7,114$	$s_5 = 0,6493$	$s_{6s} = 0,6493$	$s_7 = 1,363$	$s_8 = 0,7114$
$s_{9s} = 0,7114$	$T_1 = 450$	$T_{10} = 190,4$	$T_{11} = 67,74$	$T_{12} = 68,35$	$T_2 = 268,2$
$T_3 = 105$	$T_4 = 45,82$	$T_5 = 45,82$	$T_6 = 45,83$	$T_7 = 105$	$T_8 = 50,6$
$T_9 = 50,73$	$T_{industrial} = 180,4$	$T_{intercambio1} = 190,4$	$T_{intercambio2} = 105$	$T_{urbana} = 95$	$W_b = -20,59$
$W_{b1} = -0,3143$	$W_{b2} = -3,54$	$W_{b3} = -16,74$	$W_{NETO} = 2037$	$W_t = 2284$	$W_{t1} = 855,6$
$W_{t2} = 820$	$W_{t3} = 608,2$	$x_1 = 100$	$x_{10} = 0$	$x_{11} = -100$	$x_{12} = 0$
$x_2 = 100$	$x_5 = 0$	$x_6 = 0$	$x_7 = 0$	$x_8 = -100$	$x_9 = 0$

Resultados considerando que el sistema de calefacción de los usuarios es a través de suelo radiante

Febrero

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg

F = 15779	$h_1 = 3302$	$h_{10} = 809,6$	$h_{11} = 579,9$	$h_{12} = 586,6$	$h_{12s} = 584,9$
$h_2 = 2973$	$h_{2s} = 2891$	$h_3 = 2508$	$h_{3s} = 2384$	$h_4 = 2352$	$h_{4s} = 2290$
$h_5 = 191,8$	$h_6 = 191,9$	$h_{6s} = 191,9$	$h_7 = 334,9$	$h_8 = 255,9$	$h_9 = 257,6$
$h_{9s} = 257,2$	$\mu_{caldera} = 0,9$	$\mu_{CICLO} = 0,1643$	$\mu_{ee} = 0,426$	$\mu_{sb} = 0,75$	$\mu_{st1} = 0,7996$
$\mu_{st2} = 0,7901$	$\mu_{st3} = 0,7139$	$\mu_{st,diseño} = 0,8$	$m_1 = 5,23$	$m_{10} = 3,053$	$m_{11} = 5,23$
$m_{12} = 5,23$	$m_{1,diseño} = 5,24$	$m_2 = 5,23$	$m_3 = 2,177$	$m_{3,diseño} = 2,29$	$m_4 = 1,202$
$m_{4,diseño} = 2,11$	$m_5 = 1,202$	$m_6 = 1,202$	$m_7 = 0,9744$	$m_8 = 2,177$	$m_9 = 2,177$
$m_a = 3,053$	$m_b = 0,9744$	$m_c = 1,202$	$m_{T1} = 5,23$	$m_{T2} = 2,177$	$m_{T3} = 1,202$
$P_1 = 60$	$P_{10} = 12,66$	$P_{11} = 12,66$	$P_{12} = 60$	$P_2 = 12,66$	$P_3 = 0,4737$
$P_4 = 0,1$	$P_5 = 0,1$	$P_6 = 0,4737$	$P_7 = 0,4737$	$P_8 = 0,4737$	$P_9 = 12,66$
$Q_1 = -6606$	$Q_2 = -2117$	$Q_e = 14201$	$Q_s = -2597$	$s_1 = 6,72$	$s_{10} = 2,24$
$s_{11} = 1,714$	$s_{12s} = 1,714$	$s_2 = 6,877$	$s_{2s} = 6,72$	$s_3 = 7,227$	$s_{3s} = 6,877$
$s_4 = 7,422$	$s_{4s} = 7,227$	$s_5 = 0,6493$	$s_{6s} = 0,6493$	$s_7 = 1,075$	$s_8 = 0,8454$
$s_{9s} = 0,8454$	$T_1 = 450$	$T_{10} = 190,4$	$T_{11} = 137,7$	$T_{12} = 138,5$	$T_2 = 268,2$
$T_3 = 80$	$T_4 = 45,82$	$T_5 = 45,82$	$T_6 = 45,82$	$T_7 = 80$	$T_8 = 61,13$
$T_9 = 61,29$	$T_{industrial} = 180,4$	$T_{intercambio} = 80$	$T_{intercambio1} = 190,4$	$T_{urbana} = 70$	$W_b = -39,16$
$W_{b1} = -0,06052$	$W_{b2} = -3,599$	$W_{b3} = -35,5$	$W_{NETO} = 2593$	$W_t = 2920$	$W_{t1} = 1720$
$W_{t2} = 1013$	$W_{t3} = 186,7$	$x_1 = 100$	$x_{10} = 0$	$x_{11} = -100$	$x_{12} = 0$
$x_2 = 100$	$x_5 = 0$	$x_6 = 0$	$x_7 = 0$	$x_8 = -100$	$x_9 = 0$

Agosto

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg

F = 8724	$h_1 = 3302$	$h_{10} = 809,6$	$h_{11} = 275,7$	$h_{12} = 282,1$	$h_{12s} = 280,5$
$h_2 = 3014$	$h_{2s} = 2891$	$h_3 = 2531$	$h_{3s} = 2410$	$h_4 = 2355$	$h_{4s} = 2311$
$h_5 = 191,8$	$h_6 = 191,9$	$h_{6s} = 191,9$	$h_7 = 334,9$	$h_8 = 203,2$	$h_9 = 204,9$
$h_{9s} = 204,5$	$\mu_{caldera} = 0,9$	$\mu_{CICLO} = 0,2279$	$\mu_{ee} = 0,2639$	$\mu_{sb} = 0,75$	$\mu_{st1} = 0,6992$
$\mu_{st2} = 0,8005$	$\mu_{st3} = 0,8003$	$\mu_{st,diseño} = 0,8$	$m_1 = 2,6$	$m_{10} = 0,3043$	$m_{11} = 2,6$
$m_{12} = 2,6$	$m_{1,diseño} = 5,24$	$m_2 = 2,6$	$m_3 = 2,296$	$m_{3,diseño} = 2,29$	$m_4 = 2,113$
$m_{4,diseño} = 2,11$	$m_5 = 2,113$	$m_6 = 2,113$	$m_7 = 0,1822$	$m_8 = 2,296$	$m_9 = 2,296$
$m_a = 0,3043$	$m_b = 0,1822$	$m_c = 2,113$	$m_{T1} = 2,6$	$m_{T2} = 2,296$	$m_{T3} = 2,113$
$P_1 = 60$	$P_{10} = 12,66$	$P_{11} = 12,66$	$P_{12} = 60$	$P_2 = 12,66$	$P_3 = 0,4737$
$P_4 = 0,1$	$P_5 = 0,1$	$P_6 = 0,4737$	$P_7 = 0,4737$	$P_8 = 0,4737$	$P_9 = 12,66$
$Q_1 = -671$	$Q_2 = -400$	$Q_e = 7852$	$Q_s = -4572$	$s_1 = 6,72$	$s_{10} = 2,24$
$s_{11} = 0,9004$	$s_{12s} = 0,9004$	$s_2 = 6,952$	$s_{2s} = 6,72$	$s_3 = 7,293$	$s_{3s} = 6,952$
$s_4 = 7,431$	$s_{4s} = 7,293$	$s_5 = 0,6493$	$s_{6s} = 0,6493$	$s_7 = 1,075$	$s_8 = 0,6847$
$s_{9s} = 0,6847$	$T_1 = 450$	$T_{10} = 190,4$	$T_{11} = 65,61$	$T_{12} = 66,21$	$T_2 = 286,8$
$T_3 = 80$	$T_4 = 45,82$	$T_5 = 45,82$	$T_6 = 45,82$	$T_7 = 80$	$T_8 = 48,54$
$T_9 = 48,68$	$T_{industrial} = 180,4$	$T_{intercambio} = 80$	$T_{intercambio1} = 190,4$	$T_{urbana} = 70$	$W_b = -20,59$
$W_{b1} = -0,1064$	$W_{b2} = -3,773$	$W_{b3} = -16,72$	$W_{NETO} = 1988$	$W_t = 2229$	$W_{t1} = 747,8$
$W_{t2} = 1110$	$W_{t3} = 371,7$	$x_1 = 100$	$x_{10} = 0$	$x_{11} = -100$	$x_{12} = 0$
$x_2 = 100$	$x_5 = 0$	$x_6 = 0$	$x_7 = 0$	$x_8 = -100$	$x_9 = 0$